

Общие проблемы развития науки и техники

К ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ МОДЕЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ И МЕТОДОВ

Я. Г. НЕУЙМИН (Ленинград)

Роль моделей в современной науке, технике и общественной практике велика и общепризнана¹. Однако их историческое развитие, определяющее в конечном счете современное состояние, изучено слабо и, по-видимому, до сих пор не привлекало специального внимания историков науки и техники.

Настоящая работа представляет собой попытку проследить основные вехи исторического развития моделей, модельных представлений и методов от древнейших времен до наших дней. При этом особое внимание уделяется моделям в сфере техники и технических наук. Мы попытаемся показать, что эта область знания и деятельности служила своего рода полигоном, где осознавались, осваивались и получали конкретное воплощение многие классы моделей и методов моделирования, которые затем широко распространялись и становились общенаучным достоянием.

Обращаясь к историческим истокам моделей и моделирования в современном понимании этих терминов, необходимо выделить по крайней мере три линии их развития, которые веками существовали, не пересекаясь, и постепенно начали осознаваться как нечто единое лишь с последней трети прошлого столетия.

Первая, древнейшая линия развития модельных объектов, восходящая ко временам бронзового века, связана с технологией обработки металлов литьем, с оборудованием для литейного производства. Данные археологии позволяют с уверенностью утверждать, что уже во II—III тысячелетиях до н. э. существовали изделия из бронзы и драгоценных металлов (оружие, инструменты, предметы культа, украшения), которые не могли быть выполнены иначе, чем путем отливки в формы, изготовленные по соответствующим образцам-моделям [2]. Функции древних литейных моделей вполне совпадают с функциями аналогичных современных объектов, хотя термин «модель» здесь может употребляться только условно, ибо он более позднего латиноязычного происхождения (от *modulus* — образец, образчик).

Вторая линия развития модельных представлений тоже была связана с материальными или, точнее, вещественными образцами изделия либо сооружения, которые использовались при решении архитектурно-строительных и технических задач в материальной культуре античного мира. Датировать, хотя бы с точностью до века, первые шаги, сделанные в этом направлении, из-за недостатка источников сейчас невозможно. Однако уже в «Своде механики» Филона Византийского (III в. до н. э.) модели в этом смысле упоминаются как предмет общеизвестный и не требующий пояснений: «...необходимо иметь также метод, при помощи которого по малой модели можно сделать настоящее произведение, точно передавая соотношение всех соответствующих частей» [3, с. 157].

¹ См., например, монографию В. А. Штоффа [1].

В аналогичном смысле, но более обстоятельно, говорит о моделях Витрувий (I в. до н. э.) [4, с. 214].

Идеальные построения античной философии и науки, умозрительные, но, несмотря на это, правильно отражавшие черты и свойства реального мира и его фрагментов, являют собой истоки третьей линии развития модельных представлений. Она существенно отличается от первых двух.

Во-первых, эта линия образована только идеальными представлениями, которые в соответствии с традициями античной, а позднее и средневековой науки рассматривались как принадлежащие к сфере «чистого разума» и, как правило, противопоставлялись практике [5, с. 99]. Во-вторых, рефлексивное осознание модельного характера идеальных построений человеческого разума оказалось настолько сложной задачей, что для ее решения потребовалось двадцать с лишним веков развития научной мысли.

Целый ряд примеров блестящего использования идеальных моделей в современном понимании этого термина содержат, например, дошедшие до нас труды гениального Архимеда (III в. до н. э.).

Так, в основу трактата «О плавающих телах», в котором, как известно, сформулированы основные законы гидростатики, положены следующие гипотезы о свойствах жидкости:

«Предположим, что жидкость имеет такую природу, что из ее частиц, расположенных на одинаковом уровне и прилежащих друг к другу, менее сдавленные выталкиваются более сдавленными и что каждая из частиц сдавливается жидкостью, находящейся над ней по отвесу, если только жидкость не заключена в каком-нибудь сосуде и не сдавливается еще чем-нибудь другим» [6, с. 328].

Основываясь на этом постулате и привлекая, кроме того, понятия «более легкий», «более тяжелый», «равнотяжелый», Архимед формулирует и математически (геометрически) доказывает десять предложений о поведении твердых тел в жидкости в зависимости от их относительной «тяжести» (т. е. плотности) формы, начального положения, а также параметров (для прямоугольного параболоида). Пятое из доказанных предложений представляет собой формулировку знаменитого закона гидростатического равновесия.

В свете современных взглядов совершенно очевидно, что цитированный исходный тезис Архимеда представляет собой концептуальную (мысленную) модель, характеризующую с качественной стороны существенные для гидростатики свойства реальной жидкости, причем правомерность этой модели доказывается совпадением вытекающих из нее теоретических построений с непосредственно наблюдаемыми явлениями². Прочитанный сегодня, трактат «О плавающих телах» однозначно воспринимается как пример мастерского использования сконструированной на основе общих принципиальных соображений идеальной модели для исследования, объяснения и описания системы взаимосвязанных вполне конкретных и, главное, наблюдающихся на практике явлений, т. е. для построения теории в современном смысле этого слова...

Следующий документально зафиксированный шаг в развитии и применении на практике методов моделирования отделен от эпохи античности пятнадцатью веками и относится к эпохе Возрождения. Именно в этот период началось и далее уже не прерывалось систематическое использование масштабных материальных моделей в архитектурно-строительной практике и в инженерном деле — прежде всего применительно к многочисленным в Италии той поры гидротехническим сооружениям [7, с. 228].

² Есть основания полагать, что в отличие от большинства современников, пренебрегавших «низменными» фактами, сам Архимед придавал этому обстоятельству большое значение (см. вступ. статью И. Н. Веселовского к кн.: Архимед. Сочинения. М., 1962, с. 46—47).

Известно, например, что при сооружении купола Флорентийского собора Филиппо Брунелески (1377—1446) сначала изготовил малую масштабную модель конструкции купола, которая была рассмотрена и утверждена специальным жюри — «представителем заказчика». Затем была изготовлена более крупная рабочая модель, которая использовалась как наглядный образец непосредственно в процессе постройки [7, с. 235]. На протяжении последующих двух-трех веков развитие материальных масштабных моделей заключалось, главным образом, в расширении сферы их использования. При этом наряду со статическими сооружениями объектом моделирования все чаще становились вновь создаваемые технические устройства, связанные с активным функционированием, с механическим движением (гидравлические двигатели, водоподъемные устройства, волочильные станы, механические молоты и пр.). Соответственно менялись и задачи, решавшиеся на основе моделирования. Модель становится не только, а нередко даже не столько средством и способом поиска рациональной конструкции устройства, сколько инструментом для воспроизведения и отладки его функционирования: передачи и преобразования движений и усилий, взаимодействия частей и т. п.

Такого рода структурно-функциональные материальные модели были основой творчества мастеров-изобретателей, усилиями которых создавалась техническая база для перехода от мелкого ремесленного к мануфактурному производству. При этом как создание, так и использование моделей, в частности перенос данных, полученных на модели, на объект-оригинал, осуществлялось на эмпирико-эвристической основе методом проб и ошибок. «Научная составляющая» подобных технических и технологических моделей была исчезающе малой и сколько-нибудь существенной роли не играла: во-первых, схоластическая наука средневековья просто не могла ответить на подавляющую часть конкретных вопросов, возникавших у мастеров-техников, во-вторых, между сферой «высокой» науки и технической практикой существовала сословная и психологическая пропасть.

Подобная ситуация не претерпела принципиальных изменений и в XVIII в., в первый период промышленной революции. Об этом убедительно свидетельствует история создания Джемсом Уаттом универсальной паровой машины, благодаря полностью сохранившимся документам (патентам, личным запискам, письмам) весьма обстоятельно изученная и отраженная в литературе [8].

Творчество Уатта особенно показательно в том отношении, что оно несомненно представляло собой «передний край» технической мысли рубежа XVIII—XIX вв. Об этом свидетельствует не только социальная значимость работ Уатта, но и личность изобретателя: в отличие от большинства своих коллег механиков-практиков он был высокообразованным для своего времени человеком и поддерживал тесные контакты с рядом выдающихся естествоиспытателей той поры.

Однако методической основой его изобретательской работы был по-прежнему модельный эксперимент. Собственные записки Уатта позволяют проследить, как в результате длинного ряда специальных модельных опытов, направленных на выяснение причин повышенного расхода пара в атмосферной машине Ньюкомена, он пришел к понятию и количественной оценке «скрытой теплоты» пара (независимо от описавшего это явление физика Блэка!) и к идее отделения от постоянно нагретого цилиндра машины холодильника с искусственно пониженными температурой и давлением. Аналогичным путем — на основе осмысления и анализа последовательности целенаправленных модельных и мысленных экспериментов — решались и другие, в частности кинематические, задачи («параллелограмм Уатта», эпициклическая зубчатая передача и пр.).

| № п. п. | Проектно-исследовательские задачи | Источники идей и данных | | | |
|---------|---|-------------------------|--------------------------------|----------------|-------|
| | | прото- типы | модельные экспери- менты | эври- стика | наука |
| 1 | Выбор рабочего тела, исследование его свойств и выбор рабочих параметров | + | + | + | — |
| 2 | Снижение тепловых потерь (за счет конденсатора и «тепловой рубашки») | — | + | + | + |
| 3 | Компоновка силовой установки и собственно двигателя | + | + | + | — |
| 4 | Разработка кинематической схемы преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное | — | + | + | + |
| 5 | Обеспечение паропроизводительности котла и теплопроизводительности топки | — | + | + | — |
| 6 | Использование «отсечки» и расширения пара в цилиндре | — | + | + | — |
| 7 | Разработка системы парораспределения | + | + | + | — |
| 8 | Выбор материалов для конструктивных компонентов паросиловой установки | + | + | + | — |
| 9 | Обеспечение прочности деталей и конструкций | + | + | + | — |
| 10 | Обеспечение постоянства скорости вращения вала машины при переменной нагрузке | — | + | + | — |

Если проанализировать с современных позиций «творческую лабораторию» Уатта, то можно указать следующие источники и слагаемые его замечательных технических достижений: — опыт предшественников в области создания тепловых насосов и машин (Папин, Сэвери, Ньюкомен); — модельные эксперименты и исследования; — исключительные эвристические способности изобретателя мастерство мысленного эксперимента, инженерная интуиция, конструкторское «чутье».

Последнее (и не только по порядку!) место в этом перечне занимают данные современной изобретателю науки: механика (статика, элементы кинематики и динамики твердого тела), некоторые разрозненные сведения о тепловых процессах и их свойствах, отдельные, главным образом качественные, представления о сопротивлении материалов и прочности конструкций.

В таблице, составленной по данным [8], представлены основные проектно-исследовательские (в современной терминологии) задачи, которые были решены Уаттом при создании универсальной паровой машины, и показаны источники данных, которые мог использовать изобретатель применительно к каждой из задач. Плюс в соответствующей графе таблицы говорит о предположительном использовании данного источника; минус свидетельствует об обратном.

Данные таблицы не только наглядно иллюстрируют роль моделей и модельных исследований в создании паровой машины, но могут рассматриваться как своего рода техническое задание или перечень требований со стороны инженерной практики рубежа XVIII—XIX вв. к науке своего времени. Действительно, почти каждая из задач, содержащихся в таблице, вскоре сделалась «центром кристаллизации» одной из специфических научно-технических дисциплин, которые впоследствии в русском языке стали называться техническими науками [9].

Обусловленная промышленной революцией социально-экономическая атмосфера Англии, а позднее — и других стран, вступивших на путь капиталистического развития, стимулировала широкий общественный интерес к технике с ее проблемами и сформировала социальный заказ, адресованный «большой» науке со стороны технической практики. Известно, что такие классики науки XVIII в., как Л. Эйлер, Ж. Лагранж, И. и Д. Бернулли, а также другие выдающиеся исследователи самое серьезное внимание уделяли решению совершенно конкретных задач, свя-

занных с техникой и технологией, транспортом и строительством [10]. Многие из получавшихся при этом результатов носили фундаментальный характер и пополняли собой теоретический арсенал математики и естественных наук. С другой стороны, те же результаты, но в приспособленном для практического применения в инженерном деле виде и дополненные необходимыми опытными данными, должным образом обработанными и обобщенными, возвращались в сферу техники и технологии в форме типовых идеальных модельных конструктов («законов», расчетных формул, научно обоснованных методик), которые становились теоретическим ядром формировавшихся на протяжении XIX в. технических наук.

Существенно, что если в естественных науках идеальные теоретические построения вплоть до XX в. нередко воспринимались как описание «истинной сущности вещей», абсолютизировались³, то в области технических наук дело обстояло иначе. Здесь теоретические, как, впрочем, и эмпирические, закономерности и построения всегда воспринимались с пониманием их относительной истинности в рамках определенных условий и допущений, т. е. в модельном смысле. Техническая практика во все времена служила надежной защитой от идеалистических воззрений!

* * *

Не удивительно, что первые вполне осознанные и научно обоснованные модели появились и нашли практическое применение именно в сфере техники и технических наук.

К середине прошлого века в связи с массовым развитием парового флота, ростом водоизмещения судов и скорости их хода возник целый ряд новых технических проблем. Если в эпоху парусного флота не самый удачный выбор обводов, т. е. формы корпуса судна, вызывал лишь некоторое снижение скорости хода, не затрагивая остальных характеристик, то для парохода безошибочный выбор обводов, подбор гребного винта и согласование с системой корпус — винт мощности и скорости вращения вала паровой машины превратился в «проблему № 1». Опыт показывал, что от этого решающим образом зависят такие важнейшие технико-экономические характеристики парового судна, как скорость хода, необходимая мощность силовой установки, расход топлива на пройденную милю и, следовательно, длительность плавания [11]. По существу, речь шла о необходимости оптимизировать взаимодействие системы корпус — винт — двигатель с обтекающей судно жидкой средой по критерию максимума коэффициента полезного действия или, точнее, пропульсивного коэффициента.

Решение этой задачи методом проб и ошибок на «натуре» было невозможно по очевидным экономическим соображениям; не поддавалась она и теоретическому решению, несмотря на существование к этому времени развитой гидромеханической теории идеальной жидкости [12, с. 210]. Выход был найден на основе синтеза теории и масштабного гидродинамического моделирования, т. е. экспериментального исследования моделей проектируемых судов в специальных опытовых бассейнах о привлечением теории подобия [13].

Как известно, формулировка самых общих условий механического подобия принадлежит еще Ньютону [14, с. 422]. Однако строгое соблюдение этих условий при масштабном преобразовании системы жидкость — движущееся тело оказывается недостижимым из-за невозможности мас-

³ Чем, как ни подобными воззрениями, можно объяснить известное высказывание У. Томпсона (лорда Кельвина) о том, что «грандиозное здание физики в XIX веке в основном завершено»? Ведь эта фраза прозвучала не только накануне нового века, но и буквально на пороге великой революции в науке, которая не оставила камня на камне от «завершенности» механистической физики!

штабирования таких параметров, как ускорение силы тяжести, плотность и вязкость жидкости. Реально может быть обеспечено лишь приближенное подобие двух гидромеханических систем различных масштабов: либо в предположении пренебрежимой малости влияния вязкости (подобие по Фруду), либо без учета гравитационных сил, действующих на жидкость, т. е. волнообразования (подобие по Рейнольдсу), либо, наконец, без учета того и другого (подобие по Ньютону).

Сопротивление движению судна складывается из двух основных составляющих. Первая, играющая главную роль для надводных водоизмещающих судов, обусловлена волнообразованием на поверхности жидкости и, следовательно, подчиняется условиям подобия по Фруду. Вторая связана с трением вязкой жидкости о смоченную поверхность корпуса и соответствует критерию Рейнольдса. Очевидно, что обеспечить подобие модели реальному судну одновременно по двум различным критериям невозможно.

Метод, позволяющий обойти это затруднение и сохраняющий свое значение до нашего времени, был предложен Уильямом Фрудом (1810—1879) и впервые использован им в специально построенном опытовом бассейне. Сущность этого метода заключается в том, что сопротивление поверхностного трения для модели рассчитывается по эмпирическим формулам и затем пересчитывается на «натуру» по критерию Рейнольдса. Оставшаяся часть измеренного динамометром фактического сопротивления движению модели рассматривается как волновое «остаточное сопротивление» и пересчитывается для реального судна с помощью критерия Фруда.

Таким образом, задача была решена только на основе органического сочетания модельного эксперимента и теории, которая обеспечивала достоверный перенос данных, полученных на малой модели, на «натуру» — свойства и характеристики еще не существующего судна.

Однако значение этого достижения далеко выходило за пределы практики судостроения, теории корабля и гидродинамики.

Во-первых, основанное на теории подобия экспериментальное исследование моделей судов в опытовых бассейнах стало первым в истории примером успешного прикладного применения вполне научной модельной методики.

Во-вторых, оно стимулировало развитие теории подобия «вширь» применительно к целому ряду явлений и процессов иной физической природы (аэродинамических и газодинамических, термодинамики и теплопередачи, диффузии, фильтрации, электромагнитных явлений и пр.) и стало, таким образом, исходным пунктом формирования теории масштабного физического моделирования как общенаучного метода, применяемого в тех случаях, когда аналитическому решению задача не поддается, а материальное модельное воспроизведение исследуемой системы возможно. Был разработан и вошел в употребление целый ряд специфических критериев подобия, соответствующих различным физическим явлениям (Прандта, Нуссельта, Маха и др.), получили значительное развитие, с одной стороны, теоретические основы масштабного физического моделирования в форме обобщенной теории подобия, с другой — методы и конкретные методики модельных исследований, специальные установки и аппаратура. Нельзя не отметить, что в развитии физического моделирования внесли огромный вклад наши соотечественники: Н. Е. Жуковский, С. А. Чаплыгин, М. В. Кирпичев, А. Н. Крылов, И. Г. Бубнов, В. А. Веников и другие.

Даже сегодня, в «эпоху ЭВМ» зародившееся в области судостроения масштабное физическое моделирование сохраняет свои позиции в целом ряде областей науки и ее приложений.

Иначе обстоит дело с аналоговыми моделями, воспроизводящими свойства и характеристики некоторого материального объекта-оригинала

посредством объекта-«заместителя» тоже материального, но иной физической природы.

По мере развития и математизации классической физики становилось очевидным, что целый ряд явлений и процессов, совершенно различных по существу, описывается одинаковыми математическими выражениями⁴, причем, как выяснилось позднее, эти аналогии не формальны, а имеют в своей основе наиболее общие, фундаментальные свойства, присущие материальным системам [15].

Так были обнаружены электромеханические, электрогидравлические, электротепловые аналогии и ряд других различных по физической природе явлений, которые описываются совпадающими по структуре математическими выражениями [16]. Развитие теоретической и прикладной электротехники в конце прошлого века обеспечило чрезвычайно удобную и практически универсальную техническую базу для аналогового воспроизведения различных физических явлений с помощью «слаботочных» электрических цепей, выбором надлежащей структуры и параметров которых достигается изоморфность исследуемого процесса-оригинала и модельного процесса, протекающего в электрической цепи. Исследование изучаемого явления при этом сводилось к регулированию электрических режимов и измерению соответствующих напряжений, токов, мощностей и других электрических величин, характеризующих цепь в целом или ее участки.

Основанные на принципах электрических аналогий моделирующие установки и методы моделирования, широко распространившиеся уже в 20—30-х годах, многочисленны и разнообразны [17]. К их числу относятся, например так называемые методы электрогидродинамических аналогий (ЭГДА), реализуемые «твердотельно» или с помощью электролитических ванн, многочисленные разновидности пассивных моделей — «сеток» для воспроизведения и исследования процессов, носящих характер двух- и трехмерных полей; так называемые расчетные столы постоянного и переменного тока; электромеханические модели энергетических систем и счетно-решающие устройства, а также целый ряд узкоспециализированных приборов и установок.

Особое место среди многочисленных средств аналогового моделирования принадлежит электронным моделирующим устройствам или аналоговым вычислительным машинам (АВМ), развитие которых началось во второй половине 30-х и достигло кульминации в конце 50-х годов нашего века [18].

Развитие нового класса аналоговых моделирующих установок было прямым следствием успехов электронной техники, которая обеспечила возможность создания достаточно стабильных ламповых усилителей напряжения с очень большими коэффициентами усиления (10^6 и более). Будучи охвачен отрицательной обратной связью, такой усилитель превращается в функциональный преобразователь (операционный усилитель), который с высокой точностью осуществляет интегрирование или (и) суммирование напряжений, подаваемых на его входы. Относительная погрешность подобных преобразований, как правило, не превышает малых долей процента.

Построенная в соответствии со структурой некоторого дифференциального уравнения схема, состоящая из операционных усилителей и вспомогательных компонентов (потенциометров, реле и пр.), превращается в функциональный аналог другой физической системы, которая описывается этим уравнением. При подаче на вход такой схемы напряжения $e(t)$, соответствующего возмущению или правой части уравнения,

⁴ «Единство природы обнаруживается в „поразительной аналогичности“ дифференциальных уравнений, относящихся к различным областям явлений», — писал В. И. Ленин (Полн. собр. соч., т. 18, с. 306).

на выходе получается решение последнего в форме кривой напряжения $u(t)$, которая может быть представлена на экране осциллографа или зарегистрирована самописцем. При этом легко варьируются значения начальных условий и коэффициентов дифференциального уравнения, что позволяет с минимальной затратой труда и времени исследовать все «поле» его возможных решений и соответственно характеристик моделируемой системы.

В дальнейшем в состав электронных моделирующих установок стали включаться и некоторые нелинейные функциональные преобразователи (блоки умножения и деления, блоки произвольных нелинейных функций вида $u=f(x)$ и др.), что дополнительно расширило возможности АВМ и превратило их в весьма эффективное и популярное средство для решения исследовательских и прикладных задач, сводящихся к решению обыкновенных дифференциальных уравнений.

В 50—60-х годах АВМ получили очень широкое распространение, и промышленность серийно выпускала целый ряд типов и модификаций электронных моделирующих установок как общего пользования (ЭМУ, МПТ, МН и др.), так и специализированных. Даже в наше время, в эпоху почти безраздельного господства микроэлектронной цифровой вычислительной техники, АВМ не потеряли своего значения, выпускаются промышленностью и успешно используются при решении целого ряда задач, главным образом технического характера.

Однако наряду с несомненными достоинствами, такими, как быстродействие, простота и невысокая стоимость модельных работ, для АВМ характерен ряд недостатков. Главный из них, обусловленный «физическим» воспроизведением математических зависимостей и потому носящий принципиальный характер, заключается в невысокой точности электронных аналоговых моделей, которая к тому же быстро ухудшается с ростом сложности задачи — порядка или числа дифференциальных уравнений.

Таким образом, даже эти наиболее совершенные средства аналогового моделирования не обладают свойством универсальности. Они эффективны лишь в тех случаях, когда решение модельной задачи может быть сведено к исследованию обыкновенных дифференциальных уравнений, а требования к точности этого решения не слишком высоки.

* * *

Главное направление дальнейшего развития методов и средств моделирования, огромные возможности которого проявились только за последние 20—30 лет, лежало в сфере идеальных или, точнее, математических моделей, реализуемых с помощью электронных цифровых вычислительных машин (ЭЦВМ).

Выше мы отмечали, что рефлексивное осознание «модельности» теорий и вообще отражающих свойства, характеристики и закономерности реального мира идеальных построений науки и практики стало осваиваться научным сознанием поздно, не ранее второй половины XIX в. Этот процесс был обусловлен, с одной стороны, развитием материалистической философии и теории познания, с другой — опытом научных исследований и в особенности практикой научного решения прикладных задач, которая в этот период все шире распространялась в технике и инженерном деле. Использование некоторого идеального конструкта (закона, функциональной зависимости и др.) в области техники неизбежно сопровождалось оценкой получающихся при этом практических результатов, а подобный анализ неуклонно свидетельствовал об ограниченно истинном, модельном характере элементов теоретического технического знания. В то же время быстрое развитие технических средств диктовало необходимость постоянного углубления и расшире-

ния идеальных модельных представлений, обеспечивающих научную основу для решения технических задач.

Очень показательно в этом отношении развитие электротехники и группы научно-технических дисциплин электротехнического направления [19].

Как известно, весь ранний период формирования научных представлений об электрических, магнитных и электромагнитных явлениях в методологическом отношении базировался на гипотетических механических аналогиях и соответствующих идеальных моделях, так как субстрат этих процессов не поддавался непосредственному (органолептическому) наблюдению. Выводившиеся из механических аналогий гипотетические представления об электрических и магнитных «флюидах» с их свойствами подвергались инструментальной опытной проверке, трансформировались в соответствии с результатами экспериментов и, наконец, приобрели форму законов, которые устанавливали качественные и количественные зависимости между величинами, характеризующими соответствующие явления, по существу представляя собой частные идеальные модели (законы Ома, Био-Савара, Эрстеда, Фарадея, Кирхгофа и пр.). Этот процесс получил свое логическое завершение с созданием основанной главным образом на экспериментальных результатах Фарадея обобщенной идеальной модели в форме уравнений Максвелла, которая вскоре, как известно, была экспериментально подтверждена Генрихом Герцем [20, с. 63].

Однако выход электрических и магнитных явлений из физических лабораторий в сферу технического применения, которая быстро расширялась, потребовал нового и весьма существенного развития арсенала электротехнических научных представлений и отражающих эти представления идеальных моделей. Возникла необходимость в переходе от изолированных моделей, описывающих отдельные стороны электрических и электромагнитных процессов и явлений, к комплексному описанию, анализу и расчету соответствующих технических средств, а это повлекло за собой развитие специфического модельного языка прикладной электротехники.

Подобный язык в форме (основанных на физических законах) аналитических соотношений, эквивалентных схем с методами их преобразования, векторных диаграмм и их аналитических эквивалентов на комплексной плоскости, графоаналитических моделей существенно нелинейных цепей со сталью и пр. стал основой формировавшихся в ту пору научно-технических дисциплин электротехнического направления: теории электрических машин постоянного и переменного тока, теории проводной связи, теории электрических измерений и других.

Существенно, что язык электротехнических схем, диаграмм и аналитических зависимостей был не просто одним из возможных способов формализованного описания некоторого класса явлений и средством для их инженерного расчета. Он служил (и служит сегодня!) основой понятийного аппарата этой важнейшей в практическом отношении области научно-прикладного знания, образуя тот «субстрат» представлений, которым питается профессиональное мышление инженера-электрика.

Развитие языка идеальных моделей в электротехнике конца прошлого — начала нынешнего века, отражавшее общую тенденцию науки и техники, сыграло не только огромную прикладную, но и существенную методологическую роль в развитии науки. Оно способствовало освоению широким кругом специалистов векторных представлений, методов и их новых физических интерпретаций, ввело в инженерную практику комплексные величины и их функции, положило начало развитию символических операторных методов для анализа и расчета периодических установившихся и переходных процессов в электрических и электромагнитных устройствах. Целый ряд сложившихся в электротехнике новых на-

учны понятий (импеданс, постоянная времени и пр.), а также соответствующих формализмов вскоре проникли в другие области научного знания и, таким образом, приобрели общенаучное значение...

Характерной чертой электротехнических, как, впрочем и всех других идеальных модельных конструктов науки прошлого и первой четверти нынешнего века был их «жесткий», в духе Ньютона — Лапласа, детерминизм.

Это было обусловлено, с одной стороны, прочно сложившейся двухвековой традицией, затруднявшей осознание и включение в «парадигму» научного мышления случайных явлений, с другой — отсутствием серьезной потребности в учете случайных факторов при решении подавляющего большинства прикладных, в том числе технических, задач, характерных для того периода. Если не считать отдельных редких исключений (например, в артиллерийском деле), то теория вероятностей с ее понятийным и формальным аппаратом, уже вполне сложившаяся как математическая дисциплина, лежала в стороне от основного русла развития науки и техники, практически не оказывая влияния на господствовавший сугубо детерминистский стиль научного и научно-технического мышления. Этот стиль не смогло существенно поколебать и развитие статистической термодинамики, связанное с именами Максвелла, Больцмана и Гиббса, и даже возникновение вероятностной в своей основе квантово-механической теории. Известно, что и сам А. Эйнштейн, ранние работы которого лежали у истоков квантовых представлений, позднее выступал против квантовой теории именно из-за ее «индетерминизма» в ньютоновском механистическом смысле.

«Прорыв фронта» механистического детерминизма, который привел к интенсивному развитию и широкому применению на практике вероятностно-статистических идеальных моделей, повлек за собой ускоренное развитие фундаментальной вероятностной математики, прежде всего теории случайных процессов, и в конечном счете существенно изменил характер научных взглядов на природу причинно-следственных зависимостей, произошел в сфере техники и технических наук.

Развитие радиотехники, измерительной техники и техники автоматического регулирования было связано с использованием электрических сигналов столь малой мощности, что она оказывалась соизмеримой с мощностью случайных помех (шумов), неизбежно возникающих в линиях связи, а также порождаемых самой аппаратурой. Единственным эффективным средством для решения широкого круга задач по созданию высококачественных систем связи и другой радиоэлектронной аппаратуры, способной работать в условиях значительных случайных помех, оказалась вероятностная математика с ее аппаратом. Этот аппарат обеспечивал анализ процессов и оптимизацию характеристик электронной аппаратуры на вероятностной мере в форме математических ожиданий соответствующих величин, дисперсий, корреляционных функций и других усредненных статистических характеристик, которые, таким образом, не только получили новую интерпретацию и «физический смысл» но и превратились в технические характеристики, стали важной составной частью концептуального багажа большого отряда специалистов-инженеров.

Исключительная актуальность задач анализа и оптимального синтеза электронной аппаратуры, работающей в условиях случайных помех, дополнительно возросла в конце 30-х годов в связи с развитием радиолокационных систем и привела к тому, что работы этого направления повелись очень широким фронтом, привлекли к себе огромные научные силы (достаточно назвать такие имена, как Винер, Колмогоров, Хинчин, Шеннон, Крамер и др.) и в соответствии с общей тенденцией набиравшей скорость научно-технической революции стали развиваться невиданными ранее темпами.

Значение этого события отнюдь не ограничивалось прикладной стороной дела. Качественное расширение круга научных модельных представлений, стремительное развитие теоретических основ и приложений математического моделирования, учитывающего вероятностно-статистическую природу реальных явлений, с одной стороны, обусловили осознание единства идеальных и материальных моделей как специфического класса информационных по своему существу объектов, с другой — выявили роль моделей как универсального инструмента научного познания и исследований. В этом отношении очень показательна опубликованная в 1945 г. статья Н. Винера и А. Розенблута «Роль моделей в науке» [21].

Во-первых, она была первым общенаучным методологическим обобщением сложившихся к тому времени модельных представлений и методов. Во-вторых, содержащиеся в ней концепции оказались неотъемлемой составной частью сформировавшейся спустя несколько лет кибернетики и ряда связанных с ней новейших научных дисциплин и направлений (теория информации, теория оптимального управления, теории оптимального кодирования и фильтрации и пр.). Наконец, авторы этой работы впервые убедительно показали принципиальное единство материальных и идеальных моделей как информационных конструктов, инвариантных к способам реализации или описания. Даже сегодня, когда существует ряд других, в том числе крупных монографических, обобщающих исследований, посвященных моделям и моделированию, эта небольшая по объему работа не потеряла своего значения и по праву рассматривается как классическая.

К 50-м годам нашего века в сфере науки и техники сложилась такая ситуация, что формулировка подавляющего большинства возникавших исследовательских и прикладных задач в форме математических моделей, описывающих свойства и характеристики соответствующих макроскопических объектов, принципиальных затруднений, как правило, не вызывала. В то же время решение огромного большинства этих задач, т. е. исследование построенной модели средствами и методами математики, тоже, как правило, сталкивалось с серьезными затруднениями. Хорошо известно, что из десяти относящихся к реальным объектам математических задач по крайней мере девять не поддаются непосредственному аналитическому решению: интегралы не «берутся» в квадратурах, законы распределения вероятностей не выражаются в замкнутой форме и т. п. В качестве выхода из этого затруднения использовались, с одной стороны, всякого рода аппроксимации, например линеаризация нелинейных динамических моделей, с другой — методы приближенного численного анализа или приближенных вычислений, которые, как известно, интенсивно развивались начиная с XVII в. и к рассматриваемому времени достигли высокого совершенства [22].

Однако оба эти пути в тот период не являлись радикальным решением проблемы. Аппроксимации, обеспечивающие аналитическое решение модельной задачи, во-первых, далеко не всегда возможны, во-вторых, принципиально связаны с потерей части исходной информации о реальном объекте, что иногда может быть источником грубых ошибок (например, в задачах исследования устойчивости). Приближенные численные методы в принципе позволяют получить с заданной точностью решение почти любой сформулированной на языке математики модельной задачи. Однако объем вычислительных работ, необходимый для получения приемлемой точности, при этом часто оказывается таким большим, что численное решение задачи вручную даже при наличии «малой механизации» (арифмометры, клавишные калькуляторы) оказывается недоступным по трудоемкости и срокам.

Именно по этой причине в 50—60-е годы были столь популярны электронные моделирующие установки. Решить задачу на основе аналогового материального воспроизведения заданного некоторой матема-

тической моделью объекта почти всегда было проще, скорее и дешевле, чем искать решение задачи математическим путем в численной форме.

Однако подобная ситуация просуществовала недолго, ибо уже в 50-х годах появились и стали быстро распространяться программируемые электронно-цифровые вычислительные машины (ЭЦВМ), которые определили принципиально новую ступень в развитии идеальных моделей, методов и возможностей математического моделирования.

Беспрецедентное по темпам развитие ЭЦВМ или, точнее, информационно-вычислительных систем, которые наряду с техническими средствами включают в себя так называемое программно-математическое обеспечение, т. е. совокупность «рабочих», обеспечивающих решение задач, и вспомогательных обслуживающих программ, явилось, как известно, одним из важнейших событий новейшей истории науки и техники [23].

Даже первое поколение ЭЦВМ (Стрела, Урал-1, БЭСМ-1) с весьма скромными по нынешним меркам арифметическими и логическими возможностями сразу на несколько порядков расширило сферу применимости численных (алгоритмических) математических моделей, резко снизив ограничения, связанные с трудоемкостью вычислений и обеспечивая в то же время практически необходимую точность решения задачи. Несмотря на то, что за преимущества численного машинного моделирования в то время приходилось платить достаточно высокую цену — каждая задача требовала индивидуального программирования непосредственно на «языке» используемой машины (в машинных кодах), а составление подобных программ было весьма трудоемким и дорогим делом, — уже к середине 60-х годов машинные алгоритмические модели получили достаточно широкое распространение в целом ряде областей науки и техники, серьезно потеснив аналоговые методы моделирования.

Дальнейшее развитие машинного алгоритмического моделирования шло исключительно высокими темпами. Менее чем за десятилетие — к началу 70-х годов — модели этого класса заняли место безусловного лидера в сфере моделирования вообще, стимулировали математизацию множества областей науки и практики, ранее находившихся вообще вне сферы точного, количественно определенного знания, и, таким образом, приобрели исключительное методологическое значение.

Воздействие математики на научно-технический прогресс за последние десятилетия изменилось революционно, пишет академик А. Н. Тихонов. В наше время воздействие математики на научно-технический прогресс, на ускорение темпов его развития осуществляется через построение моделей, реализуемых с помощью ЭВМ [24].

Машинные алгоритмические модели, с одной стороны, необъятно распространились «вширь», охватив в той или иной мере все существующие области науки и ее приложений, в том числе и такие сугубо гуманитарные дисциплины, как лингвистика, психология и пр. С другой стороны, они многократно увеличили доступную «глубину анализа» за счет гораздо более полного, чем при использовании аналитических или аналоговых моделей, учета структурных и функциональных особенностей моделируемых объектов, в частности динамических и статистических. Сегодня существует множество специальных методов и приемов для алгоритмического модельного воспроизведения и исследования сложных, в том числе иерархических, систем, методы статистического имитационного моделирования, обеспечивающего изучение и описание сложных случайных явлений (например, в системах массового обслуживания), методология так называемого вычислительного эксперимента и ряд других весьма эффективных методов и методик, основанных на высокой универсальности алгоритмических математических моделей и огромных возможностях современных информационно-вычислительных систем.

Существенно, что модели рассматриваемого класса уже в 50-х годах наряду с научным приобрели огромное прикладное значение. Они стали основой консолидации и форсированного развития таких важнейших в наше время научно-прикладных областей знания и направлений, как исследование операций, экономико-математические методы, линейное и нелинейное программирование применительно к решению задач оптимизации, оптимальное управление и др.

Собственно информационно-вычислительная техника, представленная сегодня машинами четвертого поколения на полупроводниковых микросхемах высокого уровня интеграции (БИСах), совместно с программно-математическим обеспечением в форме автоматизирующих ход вычислительного процесса операционных систем, библиотек стандартных и пакетов прикладных программ, поставляемых в готовом виде изготовителем ЭВМ, алгоритмических языков и программ-трансляторов образовала в наше время специфическую относительно самостоятельную научно-прикладную область⁵. Общеизвестно, что комплексная в своей основе область информационно-вычислительных систем оказывает сегодня огромное и все возрастающее влияние на развитие науки, на технику, производство, средства коммуникаций и пр., причем одним из важнейших рычагов, через которые осуществляется подобное влияние, являются машинно-реализуемые алгоритмические модели соответствующих объектов и процессов. Есть все основания полагать, что и впредь — в обозримой перспективе — непрерывно прогрессирующие модели этого класса сохраняют свое значение главного инструмента современного человечества для научного решения подавляющего большинства исследовательских и прикладных задач.

Следует, однако, подчеркнуть, что машинные методы исследования, позволяющие извлечь практически всю информацию, содержащуюся в исходном модельном математическом конструкте, естественно, не гарантируют адекватности последнего объекту-оригиналу, т. е. достоверности и полноты исходной информации. В этом смысле алгоритмическое машинное моделирование и, в частности, так называемый машинный эксперимент носят вторичный характер. Они не исключают, как это представляется некоторым наиболее рьяным сторонникам машинного моделирования, а, напротив, предполагают тщательнейшее экспериментальное исследование объекта-оригинала и обстоятельный содержательный анализ результатов *реального* эксперимента.

Принципиальную возможность построения и использования машинной алгоритмической модели определяет наличие исходной информации, достаточной если не для целостного, то хотя бы для поэлементного описания объекта-оригинала на языке математики. Общественная практика последних десятилетий поставила на повестку дня ряд крупных, часто важнейших в социальном отношении системных задач, для которых это условие заведомо не соблюдается (экономических, экологических, производственных и т. п.). Подобные задачи относятся к числу так называемых слабоструктуризованных или «размытых» [25], которые, с одной стороны, весьма сложны (нередко содержат тысячи взаимосвязанных переменных), с другой — характеризуются значительной неопределенностью, которая связана со слабой изученностью внутренних механизмов соответствующих объектов множеством не поддающихся описанию случайных факторов и тенденций.

⁵ Любопытно, что эта область является едва ли не единственной в сфере современной науки и техники, которая развивается, по сути дела, на опытно-эвристической основе — без основополагающих теорий. Теория информационно-вычислительных систем — так называемая Computer Sciens — и сегодня находится в зачаточном состоянии, не оказывая сколько-нибудь заметного влияния на прогресс информационно-вычислительных технических средств и их программно-математического обеспечения.

Наиболее эффективным путем решения задач такого рода оказалось сочетание творческого потенциала неформального человеческого мышления и почти неограниченных информационно-вычислительных возможностей современных ЭВМ в так называемых диалоговых человеко-машинных системах [26].

Подобные системы, где человек-аналитик имеет возможность непосредственно и в реальном масштабе времени, т. е. в естественном темпе мышления, «общаться» с ЭВМ, получая необходимую информацию, характеризуются вполне определенным «разделением труда». Человек ставит задачи, формулирует критерии, использует опыт других похожих ситуаций, привлекает ассоциации, творческую фантазию и т. п. Он же, человек, принимает все окончательные решения. Информационно-вычислительная система практически мгновенно обеспечивает исследователя всей необходимой информацией, просчитывает и сопоставляет варианты, отыскивает оптимумы и вообще выполняет все формальные информационные операции и процедуры, поддающиеся алгоритмизации и представлению в форме машинных программ.

Накопленный за последнее десятилетие опыт показал, что результативность функционирования такого рода интегрированных человеко-машинных систем существенно на качественном уровне превосходит эффективность и операциональные возможности их разнородных компонентов, используемые порознь.

Таким образом, по-видимому, можно говорить о зарождении в последние годы нового класса частично формализованных моделей весьма сложных объектов, которые уместно назвать эвристико-алгоритмическими или человеко-машинными моделями...

* * *

Выше мы проследили основные вехи исторического развития моделей и методов моделирования как инструмента для решения конкретных научных и прикладных задач.

Однако с тех пор как понятие модели, расширившись, приобрело общенаучный характер и стало достоянием массового сознания, т. е. начиная с середины нашего века, система модельных представлений начала превращаться в важную составную часть научного и вообще профессионального мышления. Ясное понимание модельного характера любого связанного с объективной реальностью мыслительного процесса, осознанное разделение рассматриваемых факторов на существенные и второстепенные, обоснованное абстрагирование от последних и пр. обеспечивают в совокупности хорошо упорядоченное, структуризованное мышление, а следовательно, и его наибольшую эффективность.

Гносеологические аспекты моделирования, которые рассматриваются в ряде философских исследований (В. А. Лекторского В. С. Швырева, В. А. Штоффа и др.), очевидно, лежат за пределами данной работы. Поэтому мы ограничимся лишь констатацией их наличия.

Литература

1. Штофф В. А. Моделирование и философия. Л., 1965.
2. Богаевский Б. Л. История техники. Т. I, ч. 1. М., 1936.
3. Михайлов Б. П. Витрувий и Эллада. М., 1967.
4. Витрувий. Десять книг по архитектуре/Пер. Петровского Ф. А., М., 1936.
5. Бернал Дж. Наука в истории общества. М., 1956.
6. Архимед. О плавающих телах.— Цит. по кн.: Архимед. Сочинения. Пер. Веселовского И. Н. М., 1962.
7. Гуковский М. А. Механика Леонардо да Винчи. М.— Л., 1947.
8. Радциг А. А. Джеймс Уатт и изобретение паровой машины. Пг., 1924; Вайсенберг Л. Джеймс Уатт — изобретатель паровой машины. М.— Л., 1930; Конфедератов И. Я. Джеймс Уатт — изобретатель паровой машины. М., 1969.

9. Карпеев Э. П., Козлов Б. И., Неуймин Я. Г. Некоторые вопросы истории технических наук.— *Вопр. истории науки и техники*, 1981, № 4.
10. История механики от древнейших времен до конца XVIII века. М., 1971.
11. Верховский В. П. Опыты над сопротивлением воды на некоторые из судов Балтийского флота. СПб., 1879.
12. Власов В. Г. Теоретическая гидромеханика. М.— Л., 1935.
13. Гирс И. В. Первый русский опытовый бассейн. Л., 1968.
14. Ньютон. Математические начала натуральной философии.— В кн.: Крылов А. Н. Собрание трудов. Т. VII. М.— Л., 1936.
15. Неуймин Я. Г. О некоторых новых общенаучных понятиях.— *Вопросы философии*, 1979, № 9.
16. Эйгенсон Л. С. Моделирование. М., 1952; Тетельбаум Я. М. Электрическое моделирование. М., 1959.
17. Ольсон Г. Динамические аналоги. М., 1947.
18. Корн Г., Корн Т. Электронные моделирующие устройства. М., 1955.
19. История энергетики, электротехники и связи.— Под ред. Сотина Б. С. М., 1959; Гусев С. А. Очерки по истории развития электрических машин. М.— Л., 1955.
20. Лауэ М. История физики. М., 1956.
21. Rosenblueth A., Wiener N. Role Models Sci. Phil. Sci., 1945, v. 12, № 4.
22. Крылов А. Н. Лекции о приближенных вычислениях.— В кн.: Крылов А. Н. Собрание трудов. Т. III, ч. 1, М.— Л., 1949.
23. Апокин И. А., Майстров Л. Е. Развитие вычислительных машин. М., 1974; Электроника: прошлое, настоящее, будущее. М., 1980.
24. Тихонов А. Н. Математические модели и научно-технический прогресс.— В кн.: Наука и человечество, год 1979. М., 1979.
25. Оптнер С. Л. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. М., 1969.
26. Мини-ЭВМ и их применение/Под ред. Кауля Б. И./М., 1980.

TO THE HISTORY OF MODEL CONCEPTS AND METHODS

Ya. G. NEUYMIN

Development of the models, model concepts and methods from ancient times till our days is considered in the article. Particular attention is paid to the last decades during which model construction has transformed to the important part of general scientific methodology.