

В. Г. ГОРОХОВ

ТЕХНИКА И МАТЕМАТИКА

из истории теории механизмов и машин) *

Посвящается памяти Алексея Николаевича Боголюбова

В статье рассмотрена предыстория и история теоретического исследования механизмов и машин, а также становление инженерной деятельности и теории механизмов и машин как первой технической науки. Показано, что важную роль для развития теоретического описания машин и механизмов сыграли геометрические методы. Проанализированы достижения французской, английской, немецкой и российской школ теории механизмов и машин. Показано, что в именно работах В. В. Добровольского и И. И. Артоболевского впервые было осуществлено проецирование теоретической модели на класс потенциально возможных (гипотетических) технических систем определенного типа – механизмов. Проведенное исследование опирается на работы А. Н. Боголюбова.

Ключевые слова: механизм, машина, инженер, техническая наука, учение о перспективе, начертательная геометрия, теория механизмов и машин.

Идея теоретического исследования механизмов и машин с целью их усовершенствования восходит еще к временам поздней Античности. Математик Архимед был первым, кто с помощью математики пытался решать технические задачи. И хотя известные нам работы Архимеда посвящены анализу математических проблем, его исследования закона рычага и состояния равновесия заложили основы механики, которая, однако, не была частью естествознания. Естественные движения и изменения рассматривались, в соответствии с учением Аристотеля, в качестве предмета исследования физики, не связанной тогда с математикой; механика же изучала простые машины (наклонная плоскость, блок, винт, рычаг, полиспаст) и составленные из них механизмы с использованием математических методов.

Предыстория: техника и математика

Герон Александрийский, будучи в большей степени механиком, нежели математиком, демонстрировал в своих работах, скорее, практическое применение математических теорем и эмпирических правил для техники, использовавшейся в повседневной жизни. В своей «Механике» он, однако, не только пере-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 09-06-00042.

числяет все пять так называемых «простых машин» (ворот, рычаг, полиспаст, клин и винт), но и описывает процесс их изготовления. Общий принцип их работы Герон видит в круге:

Мы можем рассматривать линию *BE* как весы, которые могут вращаться около точки подвеса *A*. Это доказал Архимед в своей книге «О равновесии» [...] Отсюда ясно, что можно сдвинуть большую величину малой силой ¹ (см. рис. 1).

«Таким образом, опираясь на извлечения из Архимеда и применяя геометрические приемы, Герон следует принципам геометрической статики» ² и с этой точки зрения объясняет принцип действия простых машин (см. рис. 1–6).

Астрономия вплоть до Галилея и Ньютона не была связана с исследованием естественных, физических процессов, поскольку движения небесных тел, относящихся к надлунному миру, были прямым воплощением, лучше сказать, существованием геометрических фигур и законов. И для Галилея Вселенная – это книга, написанная

на языке математики, и знаки ее – треугольники, круги и другие геометрические фигуры, без которых человек не смог бы понять в ней ни единого слова; без них он был бы обречен блуждать в потемках по лабиринту ³.

Показав с помощью построенного им телескопа и доказав методами логического рассуждения схожесть надлунных и подлунных тел и процессов, Галилей открыл для математики путь к исследованию естественных, физических процессов. В то же время и Вселенная открывается исследователю в виде созданного самим Господом огромного механизма, а математика – в качестве самого совершенного инструмента для ее описания. Речь идет фактически о небесной механике, в рамках которой со времен Античности разрабатывались математические методы геометро-кинематического моделирования небесных тел. Теперь они благодаря Галилею могли быть применены не только к описанию физических процессов (движений физических тел) подлунного мира, но и в принципе к описанию движения частей машин. Галилей рассматривает Землю как «большое колесо, которое движется с огромной скоростью». Он замещает Землю колесом, а колесо-Землю – геометрической фигурой и проводит геометрическое доказательство в соответствии с постулатами и нормами евклидовой геометрии. При этом он сравнивает на геометрическом чертеже вращение двух колес (маленького и большого), а затем переходит от технической модели к описанию природного явления:

Можно считать, что вращение Земли способно отбрасывать камни не в большей мере, чем любое иное малое колесо, вращающееся столь медленно, что в двадцать четыре часа оно совершит всего лишь один оборот ⁴.

¹ Герон. Механика. Кн. II. // Архимед. Сочинения. М., 1962. С. 68.

² Левина И. С., Розжанская М. М. У истоков механики машин // Исследования по истории механики. М., 1983. С. 105.

³ Галилео Галилей. Пробирных дел мастер. М., 1987. С. 41.

⁴ Галилео Галилей. Избранные труды. В 2 т. М., 1964. Т. 1. С. 317.

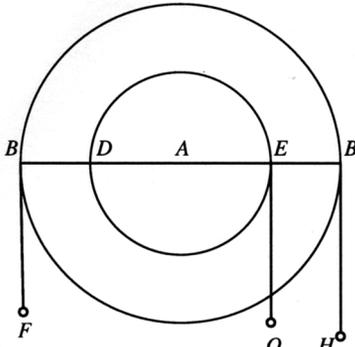


Рис. 1

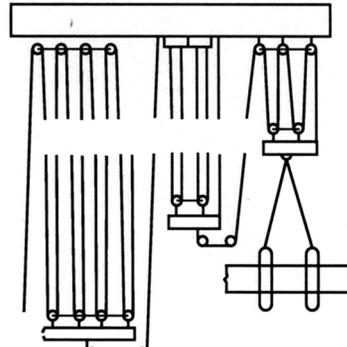


Рис. 2

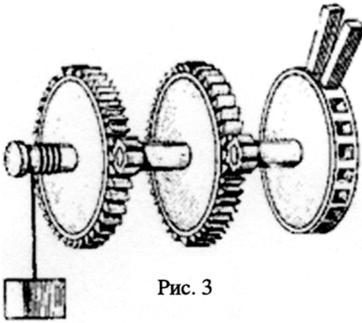


Рис. 3

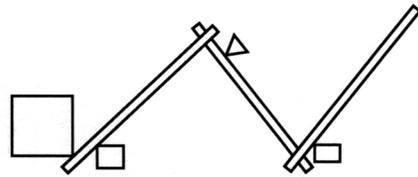


Рис. 4

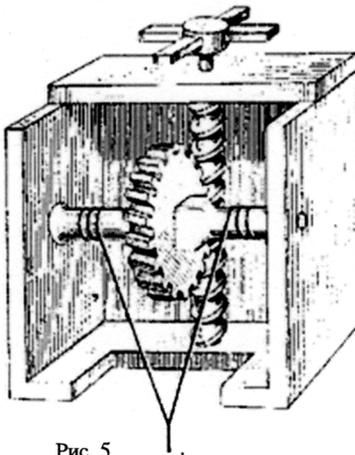


Рис. 5

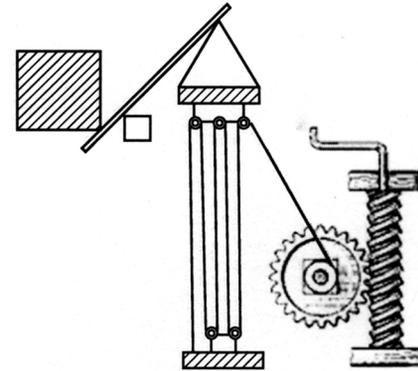
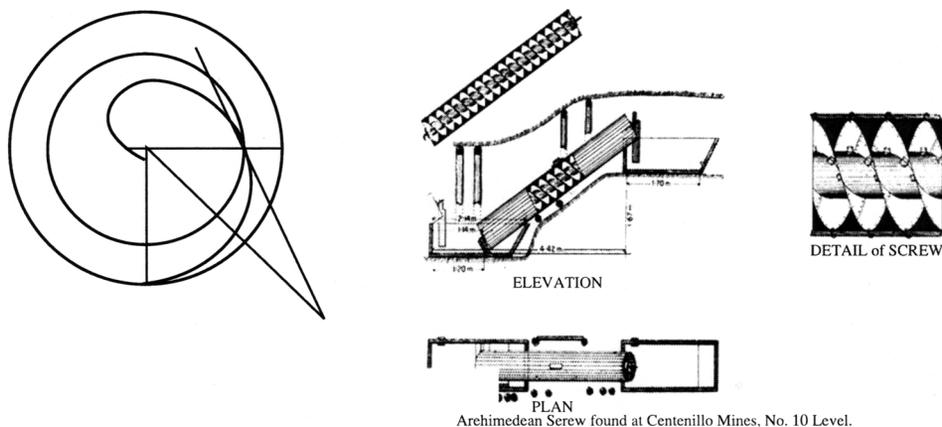


Рис. 6

Рис. 1. Герона Александрийского интересовал обций принцип работы всех «простых машин», который он видел в круге. Поэтому он начал свое объяснение с рассмотрения двух концентрических кругов с одним центром A , соединенных вместе и расположенных в одной плоскости. Линия BE «представалена как весы, которые могут двигаться вокруг точки привеса A » (Левина И. С., Рожанская М. М. У истоков механики машин // Исследования по истории механики. М., 1983. С. 104, 105). Рис. 2–4. Комбинации однородных «простых машин» – сочетания по несколько блоков, воротов и рычагов. Рис. 5–6. Комбинации неоднородных «простых машин» – сочетания ворот – винт, блок – рычаг – ворот – винт». (Левина, Рожанская. У истоков механики машин... С. 107) (Рисунки взяты из книги: Левина, Рожанская. У истоков механики машин... С. 106)



Archimedean Screw found at Centenillo Mines, No. 10 Level.

Рис. 7. Слева: Архимедова спираль (фотокопия страницы греческой рукописи, содержащей отрывок сочинения Архимеда «О спиральных» (Архимед. Сочинения. М., 1962. С. 518). Справа: винт Архимеда

Однако

практически вплоть до середины XII в. термин «механика» применялся лишь к узкому кругу проблем прикладной механики и элементарной теории пяти «простых машин»⁵.

На развитие механики в Новое время оказало влияние древнегреческое представление о непрерывном движении. Галилей писал об архимедовой теории сложения криволинейного и прямолинейного движения как о непосредственном истоке своей теории движения:

Я не предполагаю ничего иного, кроме определения движения, я хочу трактовать и рассматривать это явление в подражание Архимеду в его «Спиральных линиях»⁶.

«Трактат о спиральных интересен тем, что он представляет собой одно из немногих сочинений древнегреческой математики (но не единственное), где широко используется идея движения...»⁷ Архимед пишет:

Если какая-нибудь прямая в плоскости, равномерно вращаясь вокруг одного своего конца, удерживаемого неподвижным, вернется опять в исходное положение, и одновременно по вращающейся прямой равномерно движется некоторая точка, выходя из неподвижного конца, то эта точка на упомянутой плоскости опишет спираль⁸ (см. рис. 7).

Архимедова спираль – кривая, образуемая движением точки по линии, «которую можно определить как траекторию точки, участвующей в двух дви-

⁵ Григорьян А. Т. Механика от Античности до наших дней. М., 1971. С. 82.

⁶ Там же. С. 119.

⁷ См.: Архимед. Сочинения... С. 518 (комментарии И. Н. Веселовского).

⁸ Архимед. Сочинения... С. 229.

жениях прямолинейном и равномерном (относительном) по прямой, равномерно вращающейся вокруг одного из своих концов (переносном)», причем предложения I и II в доказательстве Архимеда «носят чисто механический характер»⁹, т. е. явно навеяны практической механикой (винт Архимеда – рис. 7).

Еще одной сферой успешного применения математики к механике становится область создания научных инструментов и в первую очередь часов для точного измерения времени, что требовалось, например, для уточнения астрономических наблюдений. Однако долгое время они были громоздки и несовершенны. Первые действительно точные часы сконструировал на основе данных науки голландский ученый Х. Гюйгенс, который реализовал в механизме часов свойство изохронности маятника. Инженерная задача, которую предстояло решить Гюйгенсу, заключалась в необходимости сконструировать такие часы, в которых качание маятника подчинялось бы определенному физическому соотношению, а именно: время падения маятника от какой-либо точки пути до самой его низкой точки не зависело бы от высоты падения. Новую конструкцию часов он разработал на основе галилеевой теории маятника и известной еще античным математикам геометрической фигуры – циклоиды (см. на рис. 8). Анализируя движение тела, удовлетворяющее этому математическому соотношению, он приходит к выводу, что маятник будет двигаться изохронно в случае падения по циклоиде, обращенной вершиной вниз.

Галилеевский закон маятника вполне точен лишь для случая тяжелой точки, подвешенной на невесомой линии и совершающей бесконечно малые колебания [...] однако [...] при качании тела точки его, в силу различного расстояния от точки привеса, должны иметь различные периоды колебаний; отсюда возникал вопрос, *каким образом общая скорость целого тела складывается из этих различных скоростей отдельных точек* (курсив в оригинале. – В. Г.)¹⁰.

Таким образом, речь идет уже не о колебании точечного тела, что является в данном случае неправомерной математической абстракцией физического маятника, а о колебании сложного тела, состоящего из конфигурации грузов.

Циклоида, как писал сам Гюйгенс, исследовалась многими и много ввиду ее пригодности для измерения времени. Циклоида – это бесконечная математическая кривая, образуемая точкой на окружности производящего круга, который катится неограниченно долго по направляющей прямой, и состоящая из бесконечного ряда арок. Открыв далее, что развертка циклоиды есть также циклоида, он подвесил маятник на нитке и поместил по обеим ее сторонам циклоидально изогнутые полосы так, чтобы при качании нить с обеих сторон прилежала к кривым поверхностям. Тогда маятник действительно описывал циклоиду. Гюйгенс пишет:

Простой маятник нельзя считать надежным и равномерным измерителем времени. Однако при помощи геометрии я нашел новый, до сих пор неиз-

⁹ См.: *Архимед*. Сочинения... С. 518 (комментарии И. Н. Веселовского).

¹⁰ *Розенбергер Ф.* История физики. М.; Л., 1937. Ч. 2. С. 154.

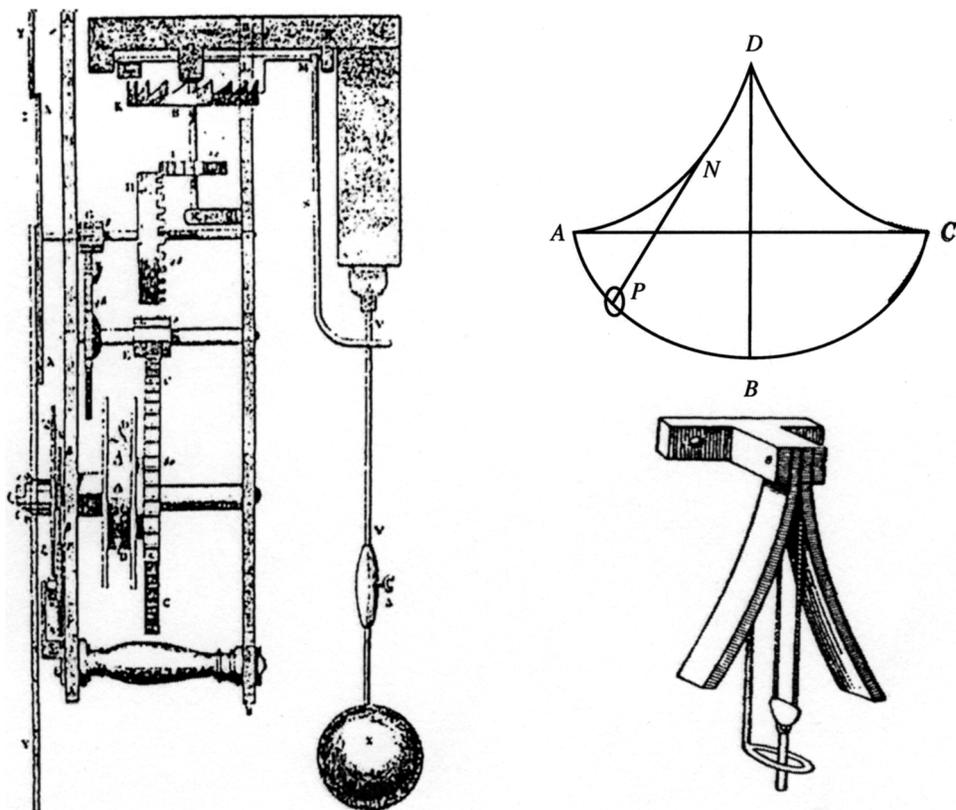


Рис. 8. Слева: часы Гюйгенса (оригинальный чертеж часового механизма, сделанный Гюйгенсом; Huygens, Ch. Die Pendeluhr. *Horologium oscilatorum*. Leipzig, 1913. S. 3–4). Справа сверху – циклоида, внизу – конструкция часов

вестный способ подвешивания маятников [...] ход часов стал чрезвычайно правильным и надежным¹¹.

Он ввел в свои часы целый ряд усовершенствований, в частности, впервые применил пружинный завод и маятник в качестве регулятора равномерности их хода. Его часы в максимальной степени использовали элементы конструкции уже существовавших механизмов, чтобы облегчить возможность быстрой переделки имевшихся хронометров в маятниковые часы. Первый экземпляр часов по проекту самого Гюйгенса изготовил голландский мастер Костер, а Гюйгенс 16 июня 1657 г. получил патент на свое изобретение. В 1658 г. выходит в свет его книга *Horologium* с описанием найденного им технического решения и рекомендацией по его использованию для точного измерения времени. Гюйгенс не перестал работать над усовершенствованием своих часов и после получения патента.

Замещая техническую задачу физической проблемой, а затем математическим описанием, Гюйгенс переходит к решению следующей математической

¹¹ Гюйгенс Х. Три мемуара по механике. М., 1951. С. 9.

задачи: по какой кривой должна двигаться точка, чтобы период ее колебаний не зависел от амплитуды, т. е. – в терминах физической проблемы, эквивалентной этой задаче, – чтобы время качания маятника не зависело от величины его размаха. На этом примере можно видеть, как в новой экспериментальной науке ученые усваивали методы работы ремесленников, постепенно совершенствуя их и поднимая на недостижимую высоту. Таким образом, они способствовали проникновению нового научно-инженерного стиля мышления в свою среду.

Так как ремесленники удовлетворяются в работе лишь малой степенью точности, то образовалось мнение, что механика тем отличается от геометрии, что все вполне точное принадлежит геометрии, менее точное относится к механике. Но погрешности заключаются не в самом ремесле или искусстве, а принадлежащей исполнителю работы: кто работает с меньшей точностью, тот – худший механик, а если бы кто-нибудь смог исполнить изделий с совершеннейшей точностью, тот был бы наилучшим из всех механиков [...] В этом смысле *рациональная механика* (курсив мой. – В. Г.) есть учение о движениях, производимых какими бы то ни было силами, и о силах, требуемых для производства каких бы то ни было движений, точно изложенное и доказанное ¹².

Таким образом, плодотворность и необходимость соединения математики и механики по крайней мере с мировоззренческой точки зрения к XVIII столетию стали очевидными (иное дело, как они реализовывались на практике).

Уже сформировавшаяся в эпоху Возрождения профессия сначала военного, а затем и гражданского инженера стала к началу XVIII в. весьма цениться при дворах князей и монархов. Свидетельством высокого социального положения представителей этой профессии является, например, описание и изображение фигур инженера и руководителя строительства на гравюрах Х. Вайгеля (1698), изображавших ряд ремесленных профессий (рис. 9). Инженер и руководитель строительства именно руководят инженерными работами и рабочими, они и одеты иначе, чем ремесленники, и своим видом напоминают, скорее, людей благородного сословия, хотя и зарабатывают на хлеб своим трудом и знаниями. Но труд этот в большей степени интеллектуальный, а знания – многочисленные научные познания.

Руководитель строительства должен уметь как хороший художник начертить на бумаге эскиз замысливаемой им постройки, а также произвести измерения на местности с помощью различных измерительных приборов, быть знакомым с учением о перспективе, уметь производить расчеты, разбираться в истории, чтобы выбрать подходящие для постройки статуи и колонны, и в медицине, чтобы установить постройку в здоровом месте, а также ориентироваться в правовых вопросах, чтобы не пришлось, например, затрачивать огромные средства, прорезывая в новом месте окно из-за тяжбы с соседями. Работающий в сотрудничестве с ним военный инженер должен иметь познания в геометрии и искусстве землемерия, а также строительной и военной

¹² *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии // *Крылов А. И.* Сочинения. М.; Л., 1936. Т. 7. С. 2.



Рис. 9. Мастер-инженер – гравюра на меди 1698 г. (Weigel, Ch. Die Bauleute (Kupferstechern von 1698). München, 1963. S. 56)

науке, чтобы уметь воспроизвести техническое устройство или сооружение сначала в эскизе на бумаге (см. на рис. 10 схему механизма для изготовления напильников, сделанную Леонардо да Винчи).

Затем инженер должен уметь возвести на местности надежные фортификационные сооружения, а также сопутствующие им хозяйственные постройки и орудия защиты с достаточным количеством боеприпасов, водоснабжением и всем, что необходимо в случае длительной осады. В военное время такой инженер занимается инженерным обеспечением армии: руководит разбивкой лагеря и созданием его укреплений, содержанием и обслуживанием артиллерии, а также подготовкой инженерных сооружений для осады и штурма неприятельских фортификацион-

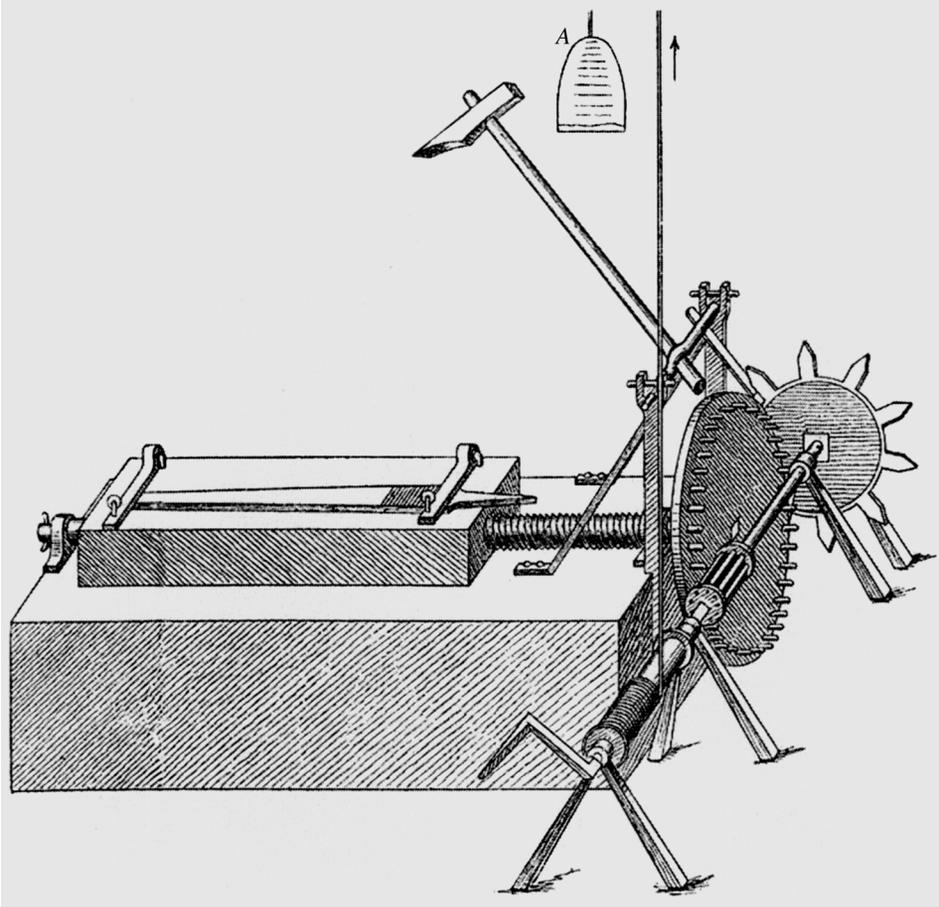


Рис. 10. Машина для изготовления напильников, спроектированная Леонардо да Винчи в 1505 г. (Beck, Th. Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaues. Berlin, 1899. S. 107, 108)

ных сооружений. Деятельность такого инженера сравнивается с ролью Архимеда при осаде римлянами Сиракуз, конструировавшего различного рода механизмы, машины и укрепления, сделавшего оборону его родного города неуязвимой для врага¹³.

Итак, понятие «инженер» ассоциировалось первоначально лишь деятельностью техников, которые имели или строго военные задачи (артиллерия, строительство крепостей), или такие государственные задачи, как землемерие, строительство дорог и водных сооружений. Таким инженером был, например, Николо Тарталья (настоящее имя – Доминико Фонтана, Тарталья – прозвище, означающее «заика»), который в 1534 г. стал профессором математики в Венеции. «Военный инженер отправляется жить туда, где он находит работу»: Доминико Фонтана служил, например, в Вероне, а в

¹³ Weigel, Ch. Die Bauleute. München, 1963. S. 58.

1592 году в Неаполе на службе у испанского вице-короля получил титул «великого инженера»¹⁴.

Постройка машин, особенно водяных и ветряных мельниц вместе с механизмами для передачи силы и приводимыми ими в движение аппаратами и орудиями, вменялась в обязанность строителям мельниц. При этом речь шла об умелых практиках, получивших свои эмпирические знания главным образом в качестве наследства от отца к сыну и известных под именем «художник-мастер», «мельничный врач»¹⁵ или «механик». Начиная со Средних веков значение машин в обществе возрастает. Они перестают быть просто забавными игрушками или служащими ритуальным целям механизмами, призванными удивить публику или продемонстрировать силу божества (как у Гомера кузница бога Гермеса или механизм для открывания дверей храма у Герона Александрийского), а начинают использоваться для практических нужд. Освобождение монахов от тяжелого ручного труда становится благим делом. Французский историк Ле Гофф приводит следующее описание в XIII в. монахом из Клерво работы механизма, движимого с помощью энергии реки, которое звучит как гимн во славу машин:

О мой Бог! Какое утешение даруешь Ты своим бедным слугам, дабы их не угнетала великая печаль! Как облегчаешь Ты муки детей своих, пребывающих в раскаянии, и как избавляешь от лишнего труда! Сколько бы лошадей надрывалось, сколько бы людей утомляли свои руки в работах, которые делает для нас без всякого труда с нашей стороны эта столь милостивая река, которой мы обязаны и нашей одеждой, и нашим пропитанием¹⁶.

Само мироздание здесь представляется как сотворенный Великим Зодчим механизм, действующий по божественным законам.

Ренессансные художники-инженеры-ученые еще более усиливают такое отношение к природе как к машине: «Машину мироздания можно назвать великой и благородной живописью, рукою Господа и природы нарисованной» (Бенедетто Варки)¹⁷ или «наш мир есть машина, и при том машина величайшая, эффективнейшая, прочнейшая, прекраснейшая» (Леонардо да Винчи)¹⁸. В эпоху Возрождения формируется новое отношение к ученому, инженеру, художнику, который занимает теперь место творца, подражающего творчеству Божественного Создателя самого бытия, природы и равному в искусстве самому Богу, поскольку ум «истинного художника может породить идею совершенного творения, а руки его в силах воплотить сию идею» (Винченцо Данти)¹⁹.

К механиками причислялись те люди, которые, особенно в городах-резиденциях или университетских городах, изготавливали астрономические, математические и физические аппараты и инструменты, для чего они должны

¹⁴ *Feldhaus, F. M. Geschichte des technischen Zeichnens. Wilhelmshafen, 1953. S. 18.*

¹⁵ Там же. S. 19.

¹⁶ *Ле Гофф Ж. Цивилизация средневекового Запада. Сретенск, 2000. С. 207–208. См. изображение такого рода мельниц в: Veranzio, F. Erfindungen von einst / Einer Einführung von Ernst H. Berninger. Dortmund, 1982. Original: Machinae novae. 1615.*

¹⁷ Эстетика ренессанса / Сост. В. П. Шестаков. М., 1981. Т. 1. С. 397.

¹⁸ Цит. по: *Григорьян А. Т., Zubov B. П. Очерки развития основных понятий механики. М., 1962. С. 9.*

¹⁹ Эстетика ренессанса... С. 454.

были обладать определенными математическими и естественно-научными познаниями. Таким инженером-механиком был, например, Я. Леопольд (1674–1727)²⁰, опубликовавший с 1724 по 1739 г. *Teatrum machinarum* – 10 книг с описаниями уже существовавших к тому времени машин – и предпринявший попытку их систематизации (последние тома вышли уже после его смерти). Леопольд проводит различие между механиком-теоретиком, который знаком лишь с общими принципами создания машин, механиком-практиком, действительно разбирающимся в машинах и знающим, как их создавать, и механиком-эмпириком, к которым относятся ремесленники, создающие и эксплуатирующие машины. Самого себя он относит к механикам-практикам. И действительно, Леопольд более всего занимался точной механикой, созданием научных измерительных инструментов. В своем «Театре машин» он собрал всевозможные известные в то время механизмы, машины, мельницы, элементы машин и орудия для их изготовления (им самим изобретенные или улучшенные, или просто ему известные). Часть они представлены в виде рисунков, созданных с использованием открытой в эпоху Возрождения параллельной проекцией, частью уже как чисто технические чертежи (рис. 11).

О важности такой описательно-систематизирующей работы свидетельствует тот факт, что для многих изобретателей этот каталог стал отправной точкой в их инженерной работе. Изобретатель паровой машины Дж. Уатт, например, изучил немецкий язык только для того, чтобы ознакомиться с «Театром машин» Леопольда. Следует, однако, отметить, что этот труд был не единственным в ряду различных «театров мельниц» того времени, хотя его и можно назвать своеобразным венцом такого рода технической литературы. В качестве другого примера можно привести книгу *Machina Nova* Ф. Веранцио (1551–1617), изданную в конце XVI – начале XVII в. в Венеции (точный год неизвестен). В книге даются не столько описания существующих машин, сколько наброски идей, подобные техническим изобретениям Леонардо да Винчи. Здесь можно найти арочный мост на бронзовых опорах, железный цепной мост и ветряную мельницу с лопаточным венцом²¹. Эти эскизы проектные, т. е. в принципе воспроизводимы, как воспроизводимы разнообразные механизмы Леонардо да Винчи, уже в наше время реализованные в виде действующих моделей в музеях.

К более поздним таким описаниям машин и механизмов можно отнести «Энциклопедию» Д. Дидро, вышедшую в свет в 1762–1777 гг. в 35 томах и содержащую сведения из самых различных областей науки и искусства. Наряду с так называемыми свободными искусствами важное место в энциклопедии отводится прикладным, или механическим, искусствам, включая технику, которые не только явно демонстрируют свою полезность, но и особую «философию»: они

обеспечивают людям то господство над природой, которое восхваляют прекрасные искусства. Господство, которое реализуется через комбинирование практики вместе с опытом и теории вместе с размышлением²².

²⁰ Banse, G., Wollgast, S. Biographien bedeutender Techniker. Berlin, 1987. S. 69–75.

²¹ См.: Veranzio. Erfindungen von einst...

²² Lewinter, R. Diderot und die Enzyklopädie // Diderots Enzyklopädie. Die Bildtafeln. 1762–1767. Erster Band. Augsburg, 1995. S. XVI.

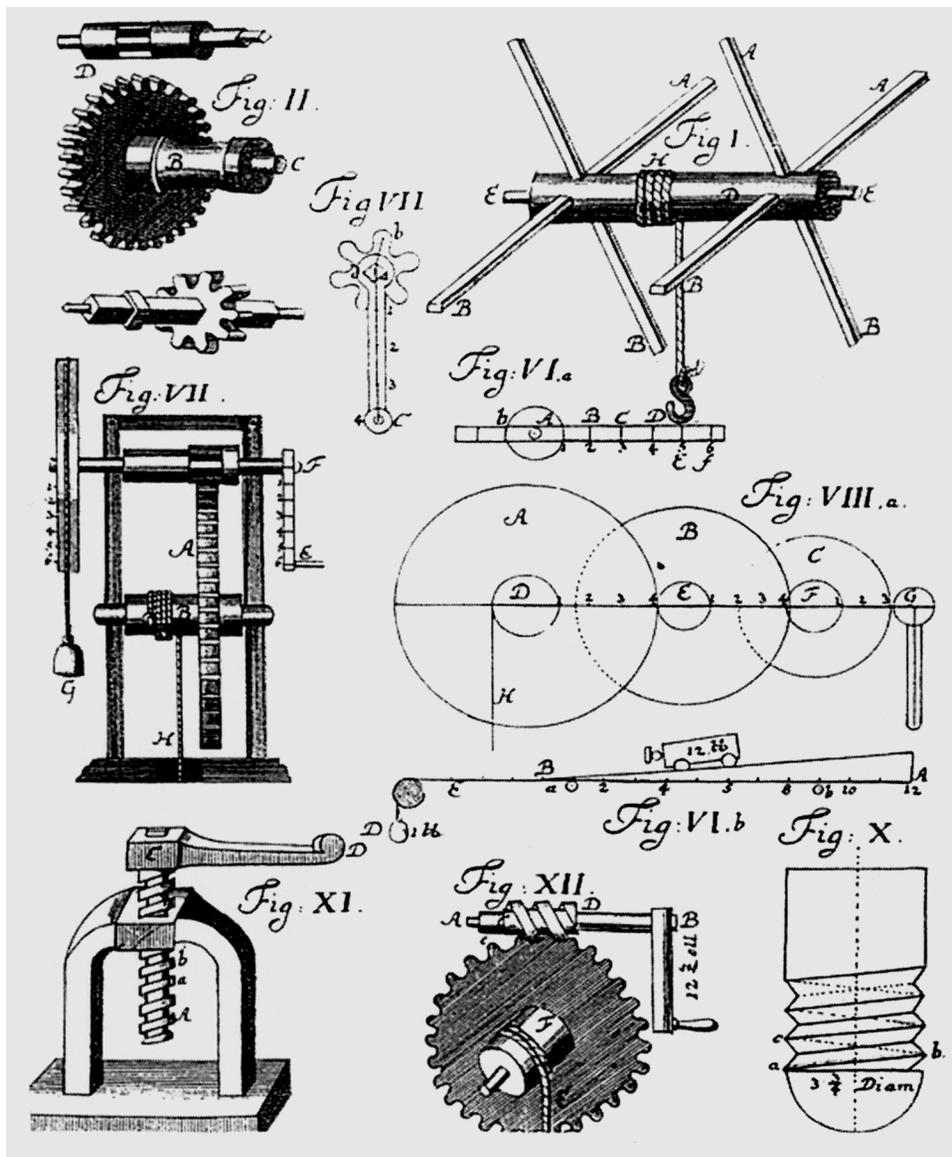


Рис. II. Примеры изображений различных машин для поднятия или перемещения тяжестей из одного из томов «Театра машин» немецкого механика Я. Лейпольда (Leopold, J. Teatri Machinarum, oder Schau-Platz der Heb-Zeuge oder Maschinen eine Last vorzubringen und zu erheben. Leipzig, 1725; Reprint: Hannover, 1982)

Не рассматривая подробно содержание этой энциклопедии, отметим лишь, что в ней механические искусства представлены непропорционально: наиболее детализованная информация содержится в разделе, посвященном созданию часовых механизмов, остальные же разделы представлены весьма поверхностно и бегло. Однако само их наличие в такого рода всеобъемлю-

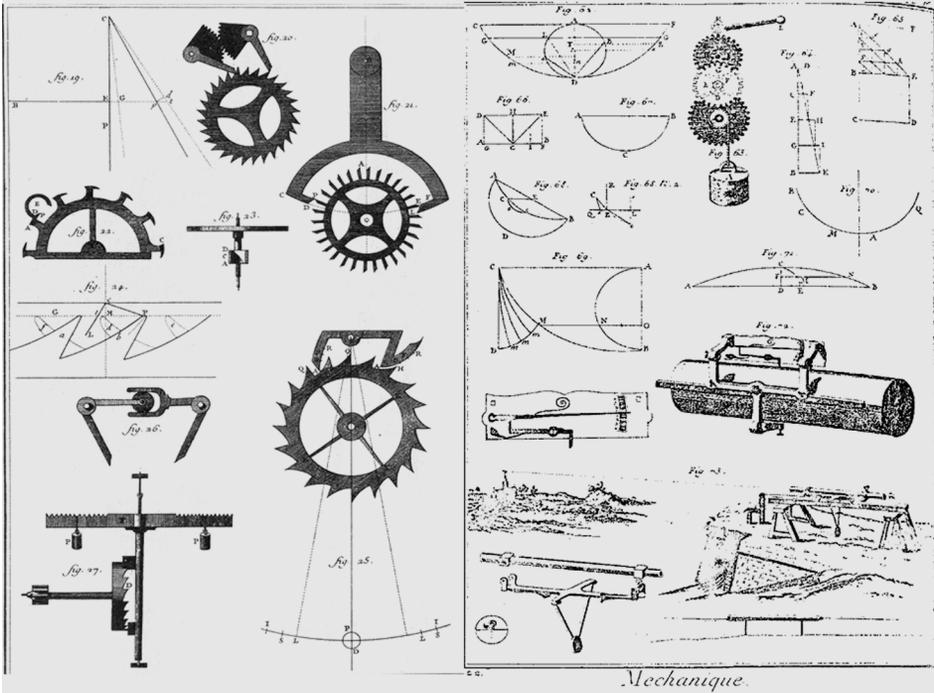


Рис. 12. Схематическое изображение механизмов во Французской энциклопедии (Diderots *Encyclopédie. Die Bildtafeln* 1762–1777. Zweiter Band. *Horlogerie, Differens Echappemens*. Augsburg, 1995. S. 48, 1024)

щей энциклопедии показывает огромный интерес, который вызывали тогда машины и механизмы (рис. 12). В 1794 г. на базе коллекции известного механика Вокансона была даже организована Консерватория искусств и ремесел, в технический музей которой были переданы также машины, хранившиеся во Французской академии наук и других коллекциях.

По уставу в консерватории должны были храниться модели, чертежи и описания всех машин, применяемых во Франции, образцы изделий промышленности и т. д.²³

Таким образом, разработка разнообразных машин (подъемных, паровых, прядильных, ткацких, мельниц, часов, станков и т. п.) к концу XVIII в. становится самой развитой областью инженерной деятельности. Реально существующие и проектируемые, они становятся предметом описания и предварительного исследования, которое, однако, основывалось первоначально на теории простых машин, предназначенных в основном для передачи действия сил (подъема и перемещения тяжестей – рычаг, ворот, наклонная плоскость и т. п.). Чтобы применить ее в инженерной деятель-

²³ Боголюбов А. Н. Гаспар Монж (1746–1818). М., 1978. С. 40.

ности, необходимо было так схематизировать сложные машины, чтобы их части можно было представить в виде сочетания нескольких простых машин – идеальных объектов, для которых существовали типовые расчеты. Однако многочисленные машины, построенные к этому времени, не укладывались в такого рода теоретическую схему, основанную на изображении передачи сил. В инженерной практике все чаще требовалось осуществить передачу движения с изменением его характера, направления, скорости. Это было обусловлено особенностями машинного производства, где множество станков должны были приводиться в движение одной машиной-двигателем, например, паровой. Несмотря на это, нужда пусть даже в несовершенной схематизации машин была очевидной. Поэтому дебаты в это время ведутся уже не о том, должна ли техника развиваться вместе с математикой или без нее, а лишь о том, какие математические методы должны в ней применяться и каким специфическим образом. В то же время практики ревниво относились к попыткам применения математики к решению инженерных задач. Да и математические методы для такого применения еще не были разработаны достаточно.

Уже художники-инженеры-ученые эпохи Возрождения ставили вопрос не только о математическом описании природы, но и о конструировании изображения (рис. 13). Живопись для художников того времени – это не простое копирование природы, а конструирование совершенного изображения: если такового в природе нет, художник составляет его из различных существующих вещей, как, например, изображение совершенного человека. Для конструирования визуального образа на основе теории перспективы у художников эпохи Возрождения была даже создана особая «машина»²⁴. Именно в этом смысле надо понимать высказывание «искусство должно подражать природе» – не в смысле копирования, а в смысле воссоздания «в искусственных построениях, где существуют свои законы» (Винченцо Данти)²⁵. «Живописец спорит и соревнуется с природой» (Леонардо)²⁶. Здесь уже виден шаг к математическому описанию не только природных объектов, но и артефактов, в том числе машин. Наиболее очевидно это в архитектуре, где постройка соборов сопровождалась геометрическими расчетами пропорций проекта храма и его воплощением в виде деревянной модели. Однако у Леонардо да Винчи мы находим и попытку применения геометрических построений для аналогичных простейших расчетов пропорций еще сравнительно несложных тогдашних машин для перемещения грузов (рис. 14). Поэтому неудивительно, что Леонардо утверждал, что «механика есть рай математических наук»²⁷. Он применял геометрические пропорции для исследования силы тяги: сила быка обратно пропорциональна диаметру колеса, перемещаемого транспортного средства²⁸.

²⁴ См. аппарат Дюрера для конструирования перспективного изображения в: *Harnest, J. Albrecht Dürer und Perspektive // Stridel, P. Dührer. Augsburg, 1996.*

²⁵ Эстетика ренессанса... С. 446.

²⁶ *Леонардо да Винчи. Избранные произведения. М., 2000. С. 275*

²⁷ Там же. С. 49.

²⁸ *Pedretti, C. Leonardo. The Machines. Florence, 1999. P. 44.*

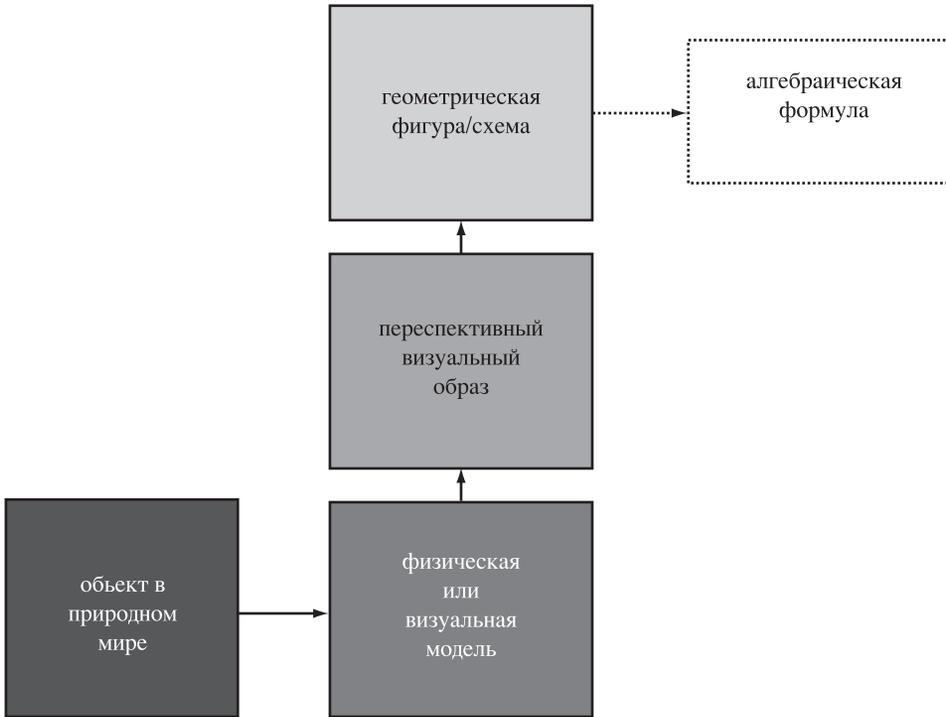


Рис. 13. Геометризация визуального представления по Леонардо да Винчи. Природный объект отображается сначала в виде физической или визуальной модели, которыми может быть скульптура, картина, макет и эскиз дома и т. п., затем эта модель преобразуется в визуальный образ в соответствии с законами перспективы и, наконец, в геометрическую схему или фигуру. И лишь последнее, важное для математизированной науки преобразование геометрической схемы в алгебраическую формулу не рассматривается Леонардо да Винчи вообще. Эту проблему решил в своей аналитической геометрии Декарт (Veltmann K. H. *Visualisation and Perspective* // *Leonardo e l'Eta della Ragione a cura di Eurico Bellone e Paolo Rossi. Milano, 1982. P. 188–189*)

Однако это – не абстрактная математика, отвлеченная от действительности. Альберти в связи с этим отмечает:

Я пишу об этих вещах не как математик, а как живописец; математики измеряют форму вещей одним умом, отрешившись от всякой матери²⁹.

Поэтому он дает материальные, зримые образы математических объектов: поверхность – это

крайняя часть тел, которая познается не в своей глубине, а только лишь в своей длине и ширине, а также в своих качествах [...] Плоская поверхность будет такая, что, если положить на нее прямую линейку, она во всех частях будет к ней прилегать. С такой поверхностью очень сходна поверхность воды³⁰.

²⁹ Эстетика ренессанса... С. 330.

³⁰ Там же. С. 331

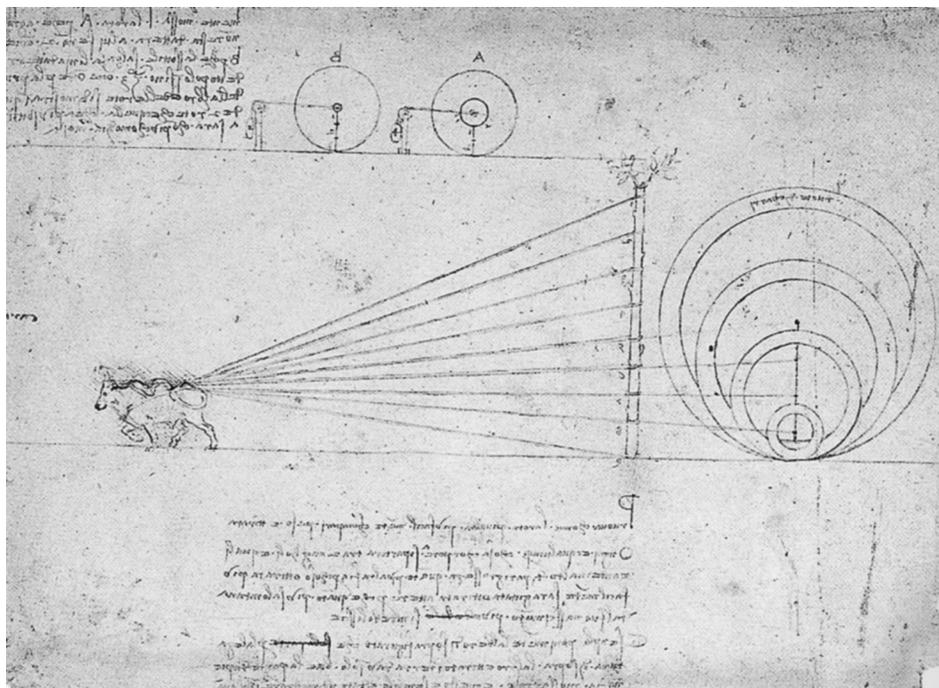


Рис. 14. Применение Леонардо да Винчи геометрических пропорций для исследования силы тяги: сила быка обратно пропорциональна диаметру колеса, перемещаемого транспортного средства (Pedretti, C. Leonardo. The machines. Florence, 1999. P. 44)

И далее: «поверхности приобретают различия в зависимости от перемены места и света»³¹. Аналогичным образом и Альбрехт Дюрер разрабатывает теорию перспективы, как особую геометрическую науку, применяя ее для изготовления своих картин и гравюр (Дюрер создал специальный аппарат для конструирования перспективного изображения и применял его для создания гравюры на меди «Меланхолия»³²).

Таким образом, здесь налицо «математизация природы», характерная для современного математического естествознания со времен Галилея и Декарта в отличие от качественной физики – «философии природы» – Аристотеля. Галилей был хорошо знаком с учением о перспективе итальянских живописцев. Именно геометризация природы, или иначе материализация геометрии, во многом и позволили Галилею создать новую науку – математизированное экспериментальное естествознание. Аналогичный шаг в области математического описания машин сделал в своей начертательной геометрии Г. Монж. Чертежи и схемы становятся для инженера средством связи одновременно с наукой (прежде всего математикой) и реальным миром технической практики.

³¹ Там же

³² Harnest. Dürer und Perspektive...

Становление теории механизмов и машин как технической науки

Заслуга Монжа (рис. 15) и заключается в том, что он сделал решающий шаг в приспособлении чистой математики к описанию конкретных машин, создав особую начертательную геометрию, которая, оставаясь строгой математической наукой, давала средства для такого описания. Эту новую науку

Монж определили следующим образом: «Искусство представлять на листе бумаги, имеющем только два измерения, предметы, имеющие три размера, которые подчинены точному определению» [...] заслуга Монжа в том, что он из разрозненных методов, элементов теории отдельных задач и не всегда конкретных способов изображения создал новую отрасль геометрии³³.

Фактически начертательная геометрия давала инженерам математически точную систему графических изображений (математическую схему), позволяющую схематизировать пространственные структуры в виде плоскостного изображения, проводить на нем необходимые расчеты с помощью стандартизованных математических преобразований, а затем применять полученные результаты в реальных условиях. Задачи такого рода постоянно возникали и решались в инженерной практике в областях архитектурного проектирования, строительства, геодезии и картографии. Монж попытался ввести этот математический инструмент в область проектирования машин и механизмов с тем чтобы дать инженеру графический метод решения инженерных задач с помощью бесконечного множества преобразований плоских фигур, «способ на основании точного изображения определять формы тел и выводить все закономерности, вытекающие из их формы и их взаимного расположения»³⁴.

По предложению Монжа, курс построения машин, введенный им впервые в Парижской политехнической школе, должен был составить часть курса начертательной геометрии. Предложенная им программа включила следующие семь разделов: основные принципы, резка камней, резка дерева, тени, перспектива, топография и машины. В последний раздел вошли:

1. Представление способов, с помощью которых можно преобразовать поступательное движение в движение по окружности и наоборот, движение по окружности в возвратно-поступательное движение и наоборот, обратно-поступательное движение в поступательное движение и наоборот.
2. Представление способов облегчения движений всех видов.
- 3 и 4. Описание основных машин, приводимых людьми, животными, силами, заимствованными у природы, подобно текущей воде, падающей воде, ветру и водяному пару³⁵.

Машина теперь рассматривалась не с точки зрения равновесия ее частей, как это делалось прежде, а с позиции движения частей в соответствии с требованиями инженерной практики. Элементарные составные части машины

³³ Там же. С. 11.

³⁴ Монж Г. Начертательная геометрия. М., 1947. С. 13.

³⁵ Боголюбов. Гаспар Монж... С. 49.



Рис. 15. Гаспар Монж (1746–1818)

стали описываться как приспособления, с помощью которых можно получить из движений одного вида движения другого вида. Такого рода идеализированное представление машины необходимо инженеру, создающему проект, во-первых, для проведения расчетов (поскольку оно дает представление об относительном сравнении величин) и, во-вторых, для ее описания в виде последовательности преобразований естественного процесса – движения. Это обеспечивает переход от исходной математической (функциональной) схемы к поточной теоретической схеме машины, позволяющей использовать естественнонаучные знания.

Не случайно, что именно начертательная геометрия явилась первой дисциплиной, с которой связывается «наука о машинах». Чтобы иметь воз-

можность применять методы теоретической механики, необходимо было так схематизировать технические системы (машины), чтобы их части можно было представить в виде идеальных объектов теоретической механики (наклонная плоскость, блок, винт и т. д.), для которых существовали типовые расчеты. Кроме того, чтобы зафиксировать принципы действия и конструкции машин, также необходимо было их схематически изобразить. Наконец, математические средства решения различных инженерных задач сравнительно долго использовались при создании машин, они уже в значительной степени были разработаны в прикладной математике, прежде всего в работах Л. Эйлера, Ж.-Л. Даламбера, Ж.-Л. Лагранжа, Ж.-Б. Фурье и др. Однако для применения графических и аналитических методов расчета необходимо было сначала особым образом изобразить, схематизировать техническую систему (в данном случае машину). Начертательная геометрия, получившая окончательное оформление как самостоятельная математическая дисциплина в трудах Монжа, как раз и давала (описывала) геометрические средства и законы такой схематизации, например, метод проецирования объекта на координатные оси. Она знакомила с принципами стереометрии, а также предоставляла детальные знания об объектах, необходимых почти для всех искусств; частным применением ее является действенное описание форм и конструкций элементарных частей машин ³⁶. Начертательная геометрия Монжа задавала способ, принцип рассмотрения технических систем (машин), который давал возможность поднять представление этих систем на более высокий теоретический уровень. В качестве такого принципа выступает рассмотрение машины не с точки зрения равновесия ее частей, как это делалось раньше, а с точки зрения их

³⁶ Клейн Ф. Лекции по истории математики. М.; Л., 1937.

движения. Тогда даже самые сложные машины являются только результатом комбинирования простейших способов преобразования движения и нужно лишь позаботиться, чтобы их перечисление было достаточно полным.

Работы последователей Монжа были направлены на адаптацию выбранной им исходной теоретической схемы в соответствии с обширным новым эмпирическим материалом, накопленным к этому времени в практике создания машин. Один из учеников Монжа, читавший вместе с ним курс начертательной геометрии в Парижской политехнической школе, Ж.-Н.-П. Ашетт, получил в 1806 г. официальное предложение подготовить курс построения машин. Его программа включила в себя следующие пункты:

1. Действие двигателя, приводящего машину в движение, прилагается в точке, которая вследствие этого описывает круг или прямую линию. В результате получается вращательное или поступательное движение.
2. Движущаяся точка, пробежавшая некоторый отрезок пути по окружности или по прямой, может быть принуждена движущей силой вернуться в исходное положение, двигаясь в обратном направлении по той же линии; так получают круговое и прямолинейное возвратные движения.
3. Обозначая R – прямолинейное непрерывное движение, r – прямолинейное возвратное движение, C – круговое непрерывное движение, c – круговое возвратное движение (качание), получаем десять комбинаций из четырех букв [...] соответственно которым рассматривается десять элементарных преобразований движений.

В нее вошли также сведения об

элементарных машинах, о круговом движении, о движении прямолинейном, о движении возвратном; о формах машин, при помощи которых эти движения комбинируются по два; распределение этих машин на десять серий; объяснение таблицы, в которой все известные машины распределены на десять серий³⁷.

После этого начинается процесс адаптации этой исходной теоретической модели Монжа путем наложения ее на эмпирический материал, содержащийся, например в «Театре машин» Леопольда или других справочных изданиях. В этом смысле является показательной книга Х. М. Ланца³⁸ и А. Бетанкура³⁹ «Курс построения машин»⁴⁰, которая представляет собой одну из первых

³⁷ Боголюбов. Гаспар Монж... С. 140–141.

³⁸ Хосе Мария Ланц (*José María Lanz*) – «родился в Мексике [...] переехал в Испанию [...] Учился в Сорбонне [...] по организации в Мадриде школы мостов и дорог (которой руководил Бетанкур) получил там кафедру математики. В годы французской оккупации сотрудничал с французами [...] выехал во Францию и, по-видимому, преподавал в Политехнической школе...» (Боголюбов А. Н. Теория механизмов и машин в историческом развитии ее идей. М., 1976. С. 110).

³⁹ Августин Августинович Бетанкур (Августин Хосе Педро дель Кармен Доминго де Канделария де Бетанкур и Молина) был инициатором создания в 1809 г. в Санкт Петербурге первой высшей технической школы в России – Института корпуса инженеров путей сообщения, созданной по образцу Парижской политехнической школы, и ее первым начальником (рис. 16).

⁴⁰ *Lanz, J. M., Betancourt, A. Essai sur la composition des machines. Paris, 1819.* Английский перевод: *Lanz, J. M., Betancourt, A. Analytical Essay of the Construction of Machines. London, 1820.*



Рис. 16. Августин Августинович Бетанкур
(1758–1824)

попыток систематизации и объяснения всех основных машин своего времени. В отличие от Ашетта они составили более обширную таблицу элементарных машин⁴¹, дав их описание в своей книге. Ашетт предусматривал 10 типов преобразований движения при помощи подобных машин, у Ланца и Бетанкура их уже 21. В предисловии к английскому изданию их книги говорится, что она дает массу важной практической информации и может рассматривать как «грамматика науки о машинах». Незаполненные клетки в их таблице были резервированы для будущих открытий и изобретений.

Однако для Ланца и Бетанкура еще характерна неоднородность изображения машин. В одних случаях (в основном для наиболее теоретически разработанных областей, например, теории зубчатых колес) изображение является последовательной реализацией исходного теоретического принципа. Оно представляет собой достаточно абстрактную схему, позволяющую решать инженерные задачи с применением средств прикладной математики и теоретической механики. В других – это только рисуночное изображение и объемные эскизы соответствующих машин, не подвергнутые теоретической обработке (см., например, увеличенную часть таблицы на рис. 17).

В книге Ланца и Бетанкура почти полностью отсутствовали расчеты (для них также требовалось более обобщенное описание машин). Чтобы дать такое описание, необходимо было сопоставить друг с другом машины данного класса. Это возможно, если вычленишь элементы (т. е. приспособления для преобразования движений одного вида в движения другого вида), общие для всех существующих машин с точки зрения принятой теоретической схемы. Однако деление машин на части по единому теоретическому принципу пока не удавалось. Во-первых, требовалась модификация исходной схемы, во-вторых, первоначальное разложение машин на элементы еще было тесно связано со стихийно сложившимися в инженерной практике различиями и изображениями машин. Эту работу проделали другие последователи Монжа, усилия которых были направлены на согласование выбранной им исходной теоретической модели с обширным новым эмпирическим материалом, накопленным к этому времени в практике создания машин. Именно в результате такого рода работы удалось выделить объект исследования будущей теории механизмов –

⁴¹ Но это уже не «простая машина» античной механики, так как «ее основное назначение – не преобразование силы, а преобразование движения» (Боголюбов. Гаспар Монж... С. 137).

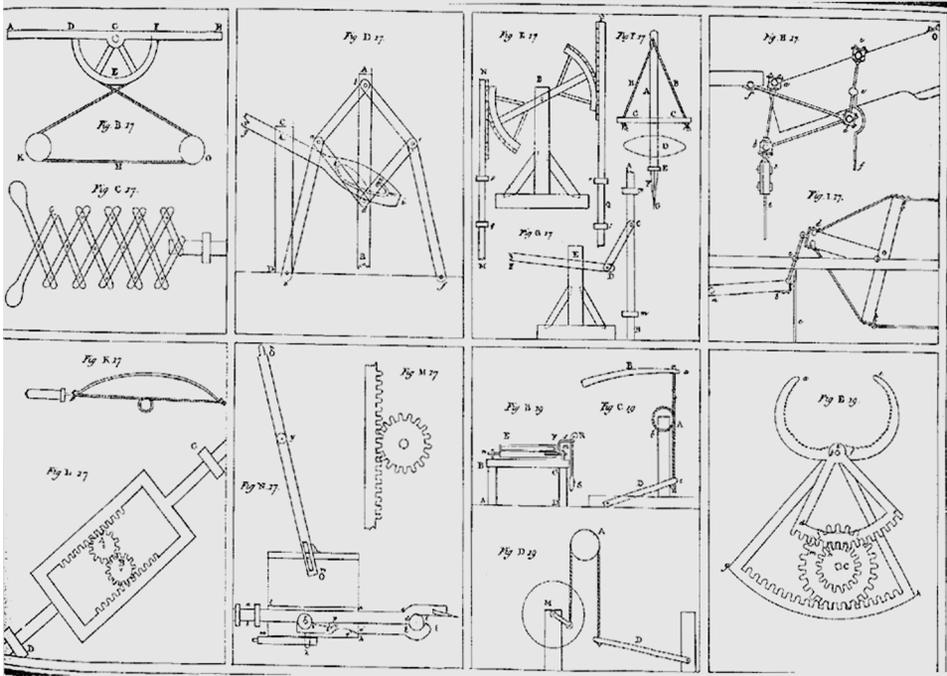


Рис. 17. Фрагмент классификационной таблицы элементарных машин из учебника Х. М. Ланца и А. Бетанкура «Аналитический очерк конструкции машин» (Lanz, J.-M., Betancourt, A. *Analytical Essay of the Construction of Machines*. London, 1820)

передаточный механизм как ту часть любой машины, которая может быть подведена под данную схему.

Одна из первых попыток дать теоретическое описание машины содержится в работе Ж. Борньи «Полный курс механики в приложении к технике»⁴². Отправным пунктом для него служит расчленение любой машины на шесть порядков частей в соответствии с функцией каждой части, т. е. ее назначением: приемник, передача, модификатор, основание, регулятор, оператор (рабочий орган). Задача регуляторов, например, заключается в исправлении неравномерности движения. Выделение именно этих конструктивных элементов было связано с различием методов, применяемых для их инженерных расчетов. Регулятор рассчитывается отдельно и иначе, чем основание. Однако у Борньи есть еще неясности в расчленении машины – непонятна, например, разница между модификатором и трансмиссией (передачей).

Ж. Кристиан в «Курсе индустриальной механики»⁴³, исследуя сущность механической операции, отмечает, что первая группа элементов, составляющих машину, применяется исключительно для восприятия движения, полученного от двигателя. Вторая группа специально предназначена для переноса в различных направлениях и для самых различных преобразова-

⁴² См.: Флаша С. Основания промышленной механики. М., 1843.

⁴³ См. там же.



Рис. 18. Роберт Виллис (1800–1875)

ний этого движения. Наконец, третья группа элементов машины необходима для выполнения действий над материалом (механической обработки). Таким образом, Кристиан четко выделяет три части всякой машины: двигатель, передаточный механизм и орудие. Значительное место он уделяет специальному рассмотрению именно передаточных механизмов и подчеркивает необходимость их отдельного исследования. Такое выделение передаточного звена было связано с тем, что на него в то время приходилась основная доля инженерной работы. Остальные части машины, например, двигатели, были еще не развиты и изготовлялись ремесленным способом или брались готовыми, как живые двигатели. Однако прежде всего оно явилось следствием наложения на эмпирический материал

и адаптации к нему исходной теоретической схемы Монжа. Передаточный механизм – это именно та часть любой машины, которая может быть подведена под данную схему. Иначе говоря, Кристиану удалось выделить объект исследования формирующейся теории механизмов. Предметом же ее исследования является кинематика механизмов – характер движения их частей.

Английский ученый Р. Виллис (рис. 18) продвинулся еще на один шаг вперед, введя различие «конструктивного» и «чистого» механизмов, последний из которых представляет собой теоретическую схему механизма, необходимую для проведения кинематических расчетов. Кроме того, он очерчивает само понятие машины и более четко расчленяет ее на части:

Всякая машина конструируется с целью выполнения определенных механических операций, каждая из которых предполагает существование [...] движущей силы и объекта, подлежащего операции [...] Машины фактически расположены между силой и работой для того, чтобы приспособить одну к другой...⁴⁴

Вслед за Кристианом он выделяет три части машины: приемник, передаточный механизм и орудие. Принципы, на которых основаны конструкция и устройство этих частей, различны. Приемники рассматриваются с точки зрения источника силы, рабочие части – с позиций выполняемой работы. Механизм же, по Виллису, необходимо исследовать без ссылки на силу и работу. Один и тот же приемник может сочетаться с различными частями и наоборот. Точно так же и механизм, вставленный между приемником силы и

⁴⁴ Willis, R. Principles of Mechanism. London, 1870. P. 1.

множеством рабочих частей, может быть изменен многими способами. Он, по мнению Виллиса, должен быть рассмотрен как самостоятельный объект исследования и проектирования. Виллис идет дальше Кристиана, предлагая исследовать механизмы, исходя исключительно из геометрических принципов, без рассмотрения сил. Тем самым подводится итог процессу адаптации исходной теоретической модели Монжа: в сфере инженерной практики выделяются те части машины, которые могут быть наиболее эффективно описаны с ее помощью. Виллис вводит также представление о жестких (ведущем и ведомом) звеньях и строит классификацию простых механизмов, исходя из принципа отношения скоростей и отношения направлений. Кинематическая задача сложных механизмов – сложение направлений и скоростей – осуществляется посредством комбинации простых механизмов.

На данном этапе формирования технической теории проблема состоит в том, чтобы дать функциональное описание всех существующих технических систем данного типа – машин. Это позволит текстуально закрепить принципы их действия. Поскольку к этому времени число реально созданных инженерных систем данного типа уже достаточно велико, то такое описание должно быть достаточно общим. Простое перечисление переходит в полутеоретическую классификацию. В своей классификации Виллис пытается задать поле механизмов, т. е. описать каждый конструктивный механизм указанным выше способом – как «чистый» механизм. Он выделяет три класса и пять групп простых механизмов. Рассматривая механизм как систему жестких звеньев, он вычленяет ведущее и ведомое звенья, которые описывает исходя из принципа отношения скоростей и отношения направлений.

Класс А. Отношение скоростей ведущего и ведомого звеньев сохраняет постоянную величину и знак для всего времени движения механизма.

Класс В. Отношение скоростей переменное по величине, но постоянно по знаку.

Класс С. Отношение скоростей постоянно по величине, но отношение направлений переменное.

Соответственно по типам механических связей между этими звеньями, т. е. по способу передачи движения, различаются следующие группы механизмов: механизмы соприкосновения качением, соприкосновения скольжением, гибкой передачи, шарнирные механизмы и механизмы с передачей движения при помощи сдвигания звеньев. Кроме того, описываются сложные механизмы, общая задача которых – сложение направлений и сложение скоростей, осуществляемое посредством комбинации простых механизмов. Описание и схематизация всех этих механизмов дается с точки зрения четких теоретических позиций. Виллис последовательно разворачивает исходные теоретические представления при помощи таких понятий, как покой, движение тела, траектория точки, направление, скорость (геометрически истолкованная), оборот, период, цикл, фаза, попеременное движение, круговое вращение и т. д. Однако автор «Принципов механизма» не задает еще единого теоретического поля, в котором можно было бы не только описывать существующие механизмы, но и строить новые. Это вызвано тем, что такая классификация не дает возможности применить к исследованию механизмов какие-либо общие методы. На данном этапе это было в принципе невозможно, так как для этого

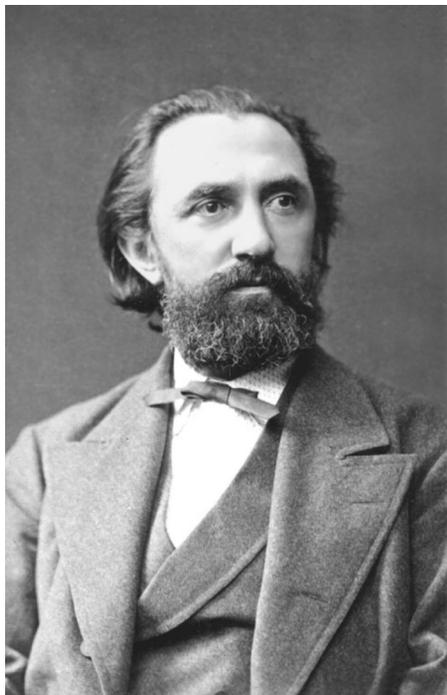


Рис. 19. Франц Рело (1829–1905)

необходимо более расчлененное представление идеального, абстрактного объекта технической теории. Невозможно было свести все многообразие сложных механизмов к совокупности ведомого и ведущего звеньев. Данная Виллисом классификация оказалась неполной даже для многих уже существовавших в его время механизмов.

Однако уже на этом этапе выдвигалось требование к формирующейся технической науке давать практические результаты. Это означает, что у Виллиса осуществляется не только схематическое описание существующих технических систем, но и собственно теоретическое исследование – разработка методов расчетов, выдвижение теорем, проведение доказательств и развитие частных теоретических схем. Однако теоретическое исследование еще не принимает на этом этапе единой, всеобщей для данной дисциплины формы – это отдельные, плохо связанные друг с другом исследования. Еще в

лекциях в Кембриджском университете Виллис делает упрек школе Монжа в том, что предлагаемая этой школой система годится только для перечисления и описания элементов машин, но ничего не дает для расчета этих элементов; кинематика же, по его мнению, должна быть не описательной, а расчетной наукой. Виллис специально разрабатывает отдельные части кинематики. В этом случае он не только строит методики расчетов, но и специально доказывает теоремы, например, теорему, связывающую характеристику профилей зацепляющих поверхностей с законами изменения угловых скоростей. Детально разработанная им теоретически и применимая практически теория зацеплений может быть рассмотрена как частная теоретическая схема теории механизмов.

Создать обобщенную теоретическую схему этой развивающейся технической науки, которая позволила бы не только объяснять принцип действия существующих, но и облегчить создание новых механизмов, поставил своей целью немецкий инженер Ф. Рело (рис. 19). Для этого он использовал достаточно развитую к тому времени графическую статику, опирающуюся на методы проективной геометрии («геометрии положения»). Однако если последняя имела дело с математическими идеальными объектами (прямая, плоскость и т. д.), то в графической статике с помощью геометрических методов решались физические и инженерные задачи. Мосты, строения и т. п. инженерные объекты представлялись в ней в виде геометрических фигур, например, многоугольника сил. Теоремы графической статики дают значительное число графических

построений, очень просто решающих многие вопросы механики, зачастую гораздо проще аналитических методов, поскольку построение нескольких линий в ней заменяет целый ряд длинных и утонченных вычислений. Транслировав обобщенную теоретическую схему из этой смежной области, Рело приспособил ее под новый эмпирический материал, развивая одновременно исходную теоретическую модель Монжа. Рело строит особую «кинематическую» геометрию и на основе выбранной им геометро-кинематической схемы проводит более детальное, чем его предшественники, расчленение механизма как однородного абстрактного объекта технической теории на части, которое приобретает характер иерархического описания механизма.

В своей книге «Теоретическая кинематика», опубликованной в 1975 г., Рело развивает представление о кинематической паре. Составляющие ее тела он называет элементами пары. С помощью двух таких элементов можно осуществить различные движения. Несколько кинематических пар образуют кинематическое звено, несколько звеньев – кинематическую цепь. Механизм является замкнутой кинематической цепью принужденного движения, одно из звеньев которой закреплено. Поэтому из одной цепи можно получить столько механизмов, сколько она имеет звеньев. Такое строение абстрактных объектов является специфичным и обязательным для технической теории, делая их однородными в том смысле, что они сконструированы, во-первых, с помощью фиксированного набора элементов и, во-вторых, ограниченного и заданного набора операций их сборки. Любые механизмы могут быть представлены как состоящие из иерархически организованных цепей, звеньев, пар и элементов (рис. 20). Это обеспечивает, с одной стороны, соответствие абстрактных объектов конструктивным элементам реальных технических систем, а с другой, создает возможность их дедуктивного преобразования на теоретическом уровне. Поскольку же все механизмы оказываются собранными из одного и того же набора типовых элементов, то остается задать лишь определенные процедуры их сборки и разборки из идеальных цепей, звеньев и пар элементов, т. е. синтеза и анализа.

Рело следующим образом формулирует задачи анализа и синтеза кинематических схем в теории механизмов и машин. Кинематический анализ заключается в разложении существующих машин на составляющие их механизмы, цепи, звенья и пары элементов, т. е. в определении кинематического состава данной машины. Конечным результатом такого анализа является выделение кинематических пар элементов (предел членения). Кинематический синтез – это подбор кинематических пар, звеньев, цепей и механизмов, из которых нужно составить машину, производящую требуемое движение.

Однако несмотря на явные достижения, Рело и его школа так и не смогли завершить работу, намеченную Виллисом, – создать теорию механизмов. Рело не только не сумел разработать единых теоретических средств для решения инженерных задач, но и совершенно опустил расчетную часть прикладной кинематики, уже в значительной степени разработанную Виллисом и французской школой. Предложенный им формальный аппарат для обозначения состава механизмов оказался громоздким и не дал практических результатов. Как реакция на «теоретичность» кинематической школы Рело наметилась более жесткая ориентация на инженерную практику. В то же время работа Рело

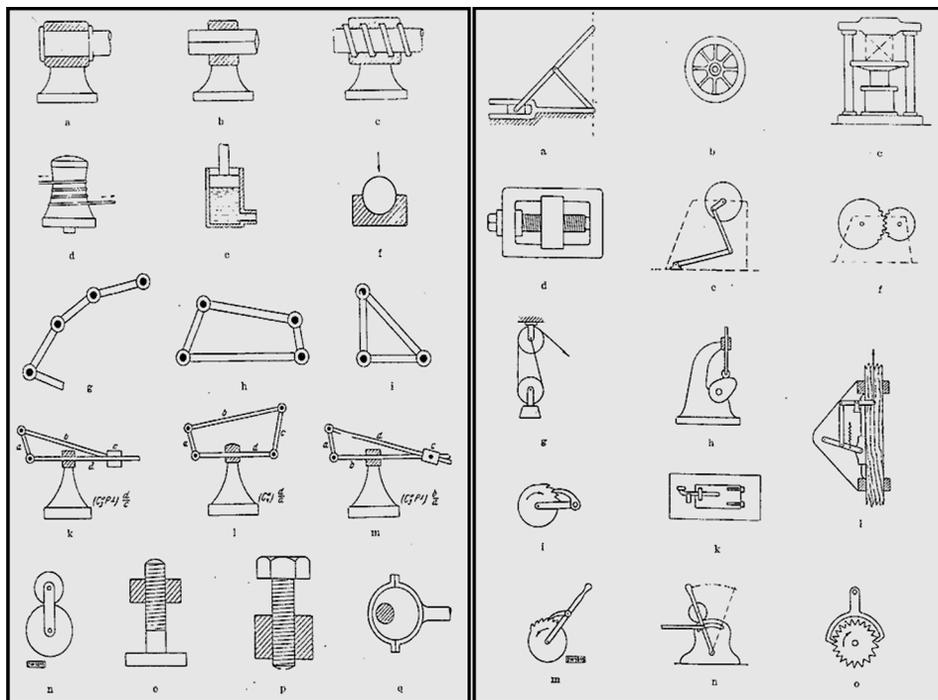


Рис. 20. Элементарные пары механизмов по Рело (Weihe, C. Franz Reuleaux und die Grundlagen seiner Kinematik // Deutsches Museum Abhandlungen und Berichte. Berlin, 1942. H. 4. S. 98–99)

вызвала широкую дискуссию, в результате которой, с одной стороны, было констатировано, что разработать расчетную математизированную теорию ему не удалось, а с другой, – еще более отчетливо была сформулирована необходимость создания единой теории механизмов с применением математических средств. И хотя Рело не применял математику, развиваемые им представления (подобно силовым магнитным линиям Фарадея), были весьма «геометричны». Поэтому именно обобщенная онтологическая схема, развитая Рело, и послужила исходным пунктом создания математизированной теории.

В это время формируется представление о разграничении двух различных дисциплин под одной крышей механики, а именно теоретической и технической механики.

Теоретическая механика концентрируется на том, чтобы строго и систематически описывать с помощью математических средств естественные процессы. Приложения, если таковые предлагаются, ей лишь поддерживаются. Техническая же механика, напротив, всегда отталкивается от практических, технических проблем и пытается решать их любыми средствами...⁴⁵

⁴⁵ Scriba, C. J., Maurer; B. Technik und Mathematik // Technik und Kultur: in 10 Bänder. Düsseldorf, 1991. Bd. 3. Technik und Wissenschaft. S. 56.

В то же время прикладная, или техническая, механика, как отмечает Рело, рассматривает машинную систему как любой природный объект с целью исследовать причинную зависимость явлений в этой системе, имея методическую направленность, т. е. вырабатывая методы исследования движения различных систем, которые могут быть затем использованы в практике машиностроения. Собственно говоря, и раньше механика теоретическая отделялась от механики практической. Еще Ньютон различал в предисловии к «Началам» механику «рациональную (умозрительную), развиваемую точными доказательствами», и практическую, к которой «относятся все ремесла и производства, именуемые механическими, от которых получила наименование и сама механика»⁴⁶.

Однако в XIX столетии это разделение получило несколько иное звучание, поскольку рациональная, теоретическая механика сильно отделилась от запросов практики, а получаемые из теории выводы не совпадали с фактами технической реальности. Это было в первую очередь связано с тем, что инженерная практика быстро продвигалась вперед, и требовалось теоретическое осмысление связанных с ней задач. Важно было приблизить теорию к практике, изменив сам характер теоретических идеализаций и схем. Например, в рациональной механике рассматриваются совершенно упругие и совершенно твердые тела, но ни те ни другие не существуют в природе и тем более в искусственных сооружениях – машинах. Техническая механика должна была восполнить образовавшийся пробел и соединить глубокие теоретические сведения с обширной практикой.

Под кинематикой, уже в классификации наук А.-М. Ампера, понимается наука, «в которой рассматривается движение само по себе»⁴⁷. В своем «Опыте философии наук», изданном в 1834 г., Ампер четко разделил предметы исследования кинематики, статики и динамики, которые являются частями механики как физико-математической науки. Кинематика

должна содержать все, что относится к различным видам движения, независимо от сил, производящих последние. Она, во-первых, должна заниматься всеми рассуждениями относительно путей, проходимых при различных движениях, относительно времен, затрачиваемых на их прохождение, а также определением скоростей [...] Она должна изучать также различные приспособления, при помощи которых можно преобразовать одно движение в другое; называя эти приспособления машинами, следует определить их [...] как приспособления, служащие для преобразования направления и скорости заданного движения [...] Вот этой-то науке, в которой движения следует изучать сами по себе, такими, какими мы наблюдаем их в телах, нас окружающих, и, в частности, в приспособлениях, называемых машинами, я дал название кинематики...⁴⁸

⁴⁶ Ньютон. Математические начала натуральной философии... С. 1.

⁴⁷ Weihe, C. Franz Reuleaux und die Grundlagen seiner Kinematik // Deutsches Museum Abhandlungen und Berichte. Berlin, 1942. Н. 4. S. 93.

⁴⁸ Боголюбов А. Н. Теория механизмов и машин в историческом развитии ее идей. М., 1976. С. 147.

Рело также различал в кинематике исследования естественных движений, например, планет вокруг солнца и искусственных движений, например, колеса машины вокруг своей оси. В первом случае движение происходит и сохраняется за счет таких внешних сил, как инерция, тяготение, центробежная сила и в любое время может быть нарушено, например, влиянием других планет, комет и т. п. Во втором – движение является принудительным, как движение колеса на твердо закрепленном валу⁴⁹. Рело пытается построить особую «кинематическую» геометрию, называя ее «чистой кинематикой», описывающую различные приемы решения задач. Эти приемы отдельно разрабатываются им для любых тел и лишь затем прилагаются к машинам. Он следующим образом определяет статус прикладной механики как самостоятельной науки:

Я называю ее наукой и не думаю, чтобы это было большой претензией с моей стороны: если угодно, назовите ее наукой второго или третьего порядка; она пользуется в своей области исследования научным методом и мало-помалу завоевывает свою самостоятельность, которая сделала необходимым ее обособление от других наук⁵⁰.

Однако наукой она стала значительно позже. При этом важно отметить, что сначала «кинематика возникла как прикладная наука: теоретическая кинематика выделилась в теоретической и аналитической механике позже»⁵¹. В начале XX в. стали развиваться два направления: во-первых, механика как математическая и физическая наука, как наука о природе, и, во-вторых, механика как теоретическая основа техники.

Впрочем, такое разграничение мы находим уже значительно раньше. Классификацию простейших видов движения осуществили уже Эйлер и Д'Аламбер.

Они рассмотрели элементарные движения – поступательное движение твердого тела и вращательное движение вокруг неподвижной оси и показали, что движение около неподвижной точки можно рассматривать как совокупность мгновенных вращений вокруг переменной мгновенной оси. Они исследовали плоско-параллельное и пространственное движение свободного твердого тела и показали, что это сложные движения, которые можно разложить на элементарные движения⁵².

Эйлер, например, доказал теорему о том, что при сложении двух вращательных движений, оси которых проходят через одну точку, получается также вращательное движение вокруг оси, проходящей через ту же точку. Исследовалось также вырождение винтового движения во вращательное или в поступательное движение. При этом многие вопросы кинематики твердого тела разрабатывались в связи с исследованием небесной механики, а также движения корабля и движения механизмов, например, четырехзвенного кри-

⁴⁹ *Weihe*. Franz Reuleaux und die Grundlagen seiner Kinematik... S. 94–95.

⁵⁰ *Reuleaux*, F. Theoretische Kinematik. Braunschweig, 1875. Bd. 1. S. 39–40.

⁵¹ *Боголюбов*. Теория механизмов и машин... С. 147.

⁵² *Григорьян А. Т., Фрадлин Б. Н.* История механики твердого тела. М., 1982. С. 116.

вошипного механизма. Причем даже в случае кинематического исследования механики механизмов и машин с точки зрения кинематики твердого тела как естественно-научной теории, движения в них представлялись частным случаем движения твердого тела, подобно тому как движение четырехзвенника представляло интерес с точки зрения изучения циклических кривых. Эйлер, например, в работе «Полная теория машин, приводимых в движение водой», изданной в 1756 г., дает теоретическое описание общего движения идеальной несжимаемой жидкости в достаточно узких трубках двойной кривизны, вращающихся вокруг оси⁵³. При этом параллельно развивается новый математический аппарат, например, векторное исчисление, доказываются теоремы и разрабатываются частные теоретические схемы как, к примеру, теория винтов (о возможности приведения любого движения твердого тела к винтовому движению).



Рис. 21. Леонид Владимирович Ассур (1878–1920)

В середине XX века в связи с новыми задачами, связанными с динамикой ракет, теорией прочности резервуаров, гидростроительством, теорией корабля и другими вопросами, особенно важной стала проблема движения твердого тела с полостями, полностью или частично заполненными жидкостью. Появилось много исследований в этой области [...] таких, например, как исследование линеаризованных уравнений движения с применением методов теории малых колебаний и спектральной теории операторов...⁵⁴

Как мы видим, и в этом направлении технические задачи стимулировали постановку и исследование естественно-научных проблем, результаты которых были важны для инженерных разработок. Однако само это направление разрабатывалось в плане развития естественно-научной теории.

Второе направление было непосредственно связано с развитием технической механики как теоретической основы техники – кинематики машин и механизмов, – выросшей, в конечном счете в новую техническую теорию – теорию механизмов и машин. Универсальную теоретическую схему для исследования различного рода механизмов разработал в конце XIX столетия российский машиновед Л. В. Ассур (рис. 21) исходя из единых принципов их структурной классификации.

⁵³ Euler, L. Vollständigere Theorie der Maschinen, die durch Wassers in Bewegung versetzt werden. Leipzig, 1911.

⁵⁴ Григорьян, Фрадлин. История механики твердого тела... С. 206–207.

Его целью была разработка системы общего кинематического и кинетостатического анализа механизмов любого строения. В связи с этим он расширяет и понятие кинематической цепи, рассуждая следующим образом:

Если ввести в терминологию степень изменяемости, то можно обобщить термин кинематической цепи и говорить о кинематических цепях разных степеней изменяемости. С этой точки зрения различие между фермой и механизмом только в степени изменяемости, лежащей в основе их кинематической цепи.

При неподвижном укреплении одного звена такой цепи образуется ферма. Если говорить о статически определимых фермах, то достаточно «будет указывать, что лежащая в основе их цепь неизменяема»⁵⁵. Такая схема давала возможность не только распределять механизмы на группы по общим признакам, но и применять общие методы решения задач. Некоторые из них были разработаны самим Ассуром, например, методы «особых точек», «ложных картин скоростей» и т. п., иные же, разработанные другими учеными и инженерами ранее, он включил в контекст своей классификации. Эти методы заключались в установлении четкого соответствия между геометрическими представлениями механизма (функциональными схемами) и его кинематическими (поточными) схемами:

...дважды применив к описанию структуры механизмов процесс схематизации, Ассур приходит к некоторым образованиям, являющихся схемами каких-то конкретных механизмов, но над которыми можно производить некоторые формальные операции⁵⁶ (см. рис. 22).

В анализе структуры кинематических цепей метрические соотношения и форма отдельных звеньев не играют никакой роли, поэтому их изображение становится предельно простым: следует

бесповодковые звенья обозначить кружками, поводковые соединительные цепи – прямыми линиями, а замки пунктиром, одноповодковые звенья, а также группы их, примыкающие к бесповодковым звеньям, – кривыми линиями. Тогда замкнутую цепь любого типа можно будет изобразить в виде кружков, соединенных между собой системами линий⁵⁷.

Эта математическая схема, полученная путем выхолащивания механической сущности, наводит его на мысль о возможности использования незнакомого ему прежде математического направления – топологии. «Таким образом, задача структурного анализа механизмов оказывается задачей топологической...»⁵⁸. Скажем, при использовании метода аналогов скоростей и ускорений решение задачи распадается на два этапа: сперва производится определение геометрической модели движения с помощью аналогов скоро-

⁵⁵ Артоболевский И. И., Боголюбов А. Н. Леонид Владимирович Ассур. 1878–1920. М., 1971. С. 153–154.

⁵⁶ Там же. С. 110

⁵⁷ Там же. С. 113

⁵⁸ Там же. С. 114.

Рис. 22. Пример изображения механизма в виде геометрической схемы. (Артоболевский И. И., Боголюбов А. Н. Леонид Владимирович Ассур. 1878–1920. М., 1971. С. 125, 126, 128, 130, 131)

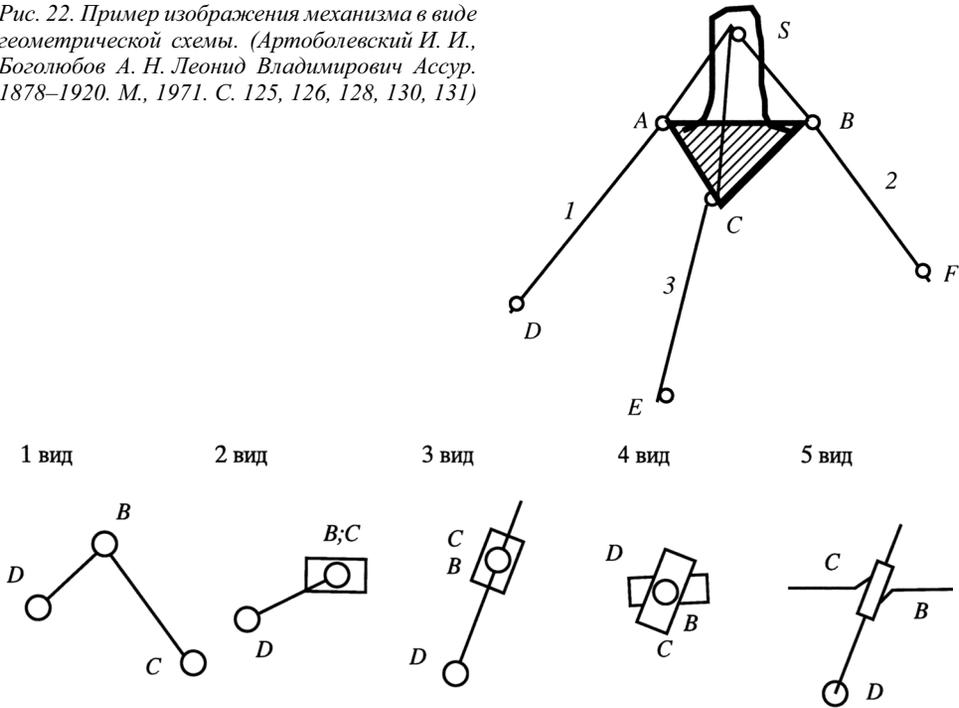


Рис. 23. Структурные группы 2-го класса (двухпроводковые группы Ассура)

стей и ускорений, а затем с помощью кинематических и динамических данных движение механизма приводится к данному конкретному случаю.

Л. В. Ассур предложил простой метод синтеза структурных схем плоских механизмов путем последовательного присоединения к первичному механизму особых кинематических цепей – групп [...] Группой называется кинематическая цепь, которая после присоединения к стойке своими свободными элементами имеет степень подвижности, равную нулю. Кроме того, в группах Ассура все кинематические пары низшие. Класс групп определяется по предложению И. И. Артоболевского числом кинематических пар, входящих в замкнутый контур, образованный внутренними кинематическими парами. Порядок группы определяется числом внешних элементов кинематических пар, которыми группа присоединяется к имеющемуся механизму: первая группа присоединяется к первичному механизму, каждая последующая – к полученному механизму, при этом нельзя присоединять группы к одному звену (см. рис. 23)⁵⁹.

На базе такого рода обобщенной или универсальной для данного класса технических систем (механизмов) теоретической схемы В. В. Добровольский и И. И. Артоболевский создали математизированную теорию механизмов.

⁵⁹ Структурный анализ механизмов (электронный ресурс). См.: <http://www.nuru.ru/tmm/007.htm>.

Характерной особенностью науки о механизмах первой половины XIX века является то, что она возникла как описательная наука и такую же продолжала оставаться. Математические методы в ней за очень небольшим исключением не применялись. Преобразование кинематики механизмов и создание на основании ее принципов расчетной науки было начато П. Л. Чебышевым⁶⁰.

В последней четверти XIX в., наоборот, чрезмерное увлечение математическими упражнениями, оторванными от технической практики, привело к известному отчуждению теоретиков от техников, по мнению которых «физическое и инженерное мышление угнеталось формальными математическими рассуждениями». Редакции многих технических журналов не хотели принимать к публикации статьи математического содержания, «потому что результаты их зачастую оказывались в кричащем противоречии с действительностью»⁶¹. Однако необходимость использования математических методов не оспаривалась, речь шла о разработке и применении таких из них, которые давали бы средства решения практических технических задач. Однако в развитии теории механизмов и машин настал момент, когда в ней был поставлен вопрос о математизации этой теории в целом, переведший ее «из разряда прикладных наук в разряд наук фундаментальных»⁶².

Причем для решения задачи математизации возникла необходимость некоторой модификации обобщенной теоретической схемы, введенной Ассуром.

Добровольский распространил принцип построения цепей, выработанный Ассуром для плоских механизмов, на любые пространственные механизмы⁶³.

Артоболевский поставил в качестве цели исследования опыт создания единой теории структуры кинематических цепей:

В учении об элементах, почти не делалось попыток установить связь и преемственность методов структурного анализа с методами кинематического и динамического анализа. Отсутствие подобной преемственности методов нам кажется существенным недостатком. Структурный анализ, кроме самостоятельных целей, имеет задачей дать исчерпывающий ответ на вопрос о наиболее рациональных методах кинематического и динамического анализа механизмов. Если подходить к вопросам структурного анализа с этой точки зрения, то необходимо пересмотреть и уточнить некоторые основные понятия и определения, относящиеся к теории структуры кинематических цепей⁶⁴.

Каждый механизм стал рассматриваться как кинематическая цепь, состоящая из одного или нескольких замкнутых контуров и нескольких замкнутых

⁶⁰ Артоболевский, Боголюбов. Леонид Владимирович Ассур... С. 63

⁶¹ Боголюбов А. Н. Жан Виктор Понселе. 1788–1867. М., 1988. С. 192.

⁶² Боголюбов А. Н. Иван Иванович Артоболевский (1905–1977). М., 1982. С. 131.

⁶³ Артоболевский, Боголюбов. Леонид Владимирович Ассур... С. 195

⁶⁴ Там же. С. 196.

цепей, служащих для присоединения звеньев контура к основным звеньям механизма. Для того чтобы образовать из контура-ядра новые механизмы, принадлежащие к данной группе, необходимо присоединить к нему поводки и ветви. В результате проведения такой классификации выяснилось, что механизмы одного и того же рода исследуются идентичными методами. Это позволило создать общую теорию кинематических цепей с развитым слоем функциональных схем. В теории механизмов появилась возможность получать новые конструктивные схемы механизмов дедуктивным способом.

Таким образом, в работах Добровольского и Артоболевского впервые было осуществлено проецирование теоретической модели на класс потенциально возможных (гипотетических) технических систем определенного типа – механизмов. Сам Артоболевский (рис. 24) следующим образом характеризует полученные результаты:



Рис. 24. Артоболевский Иван Иванович (1905–1977)

1. Законы структурного образования являются общими для всех механизмов.
2. Анализ общих законов структуры механизмов позволяет установить все возможные семейства и роды механизмов, а также создать единую общую классификацию механизмов.
3. Структурный и кинематический анализ механизмов одного и того же семейства и класса может быть проведен аналогичными методами [...]
4. Проведенные исследования показывают, что современная техника использует очень малое количество механизмов. Предлагаемый [...] метод структурного анализа дает возможность обнаружить огромное число новых механизмов, до сих пор не применявшихся в технике. Эти новые виды механизмов могут быть рекомендованы к использованию на практике...⁶⁵

Дальнейшее развитие этой технической теории шло по пути разработки все более обобщенной теоретической схемы, ее развертывания в соответствии с заданными принципами. Во-первых, она была распространена на новые типы конструктивных элементов – пространственные механизмы и жидкие звенья и т. д. Во-вторых, кинематическое представление – структурная схема теории механизмов – охватило двигатель и орудие: машина – это механизм в работе, машина на холостом ходу – механизм. Двигатель и орудие рассматриваются в

⁶⁵ Добровольский В. В., Артоболевский И. И. Структура и классификация механизмов. М.; Л., 1939. С. 65.

этом случае как двигательный и исполнительный механизмы. В-третьих, методы и теоретические схемы динамики были использованы при исследовании передаточных механизмов. Именно поэтому данная теория получила название теории механизмов и машин. Доказательством универсальности построенной Добровольским и Артоболовским теоретической модели и правильности выводов из нее явилась сама инженерная практика. Данная модель оказалась весьма действенным инструментом в руках конструкторов: созданная система позволила облегчить создание новых механизмов, вооружила конструкторов научно-обоснованными методами проектирования механизмов. Однако при синтезе новых механизмов нельзя ограничиваться лишь структурным синтезом на основе исследования возможных сочетаний кинематических пар, образующих такие вновь синтезированные цепи, а важно учитывать всевозможные конструктивные параметры и функциональное назначение механизмов, т. е. перейти от функциональных и поточных к структурным (конструктивным) схемам. Для этих целей был привлечен и соответствующий «математический аппарат: теории приближенных функций, матрично-тензорный анализ, винтовое исчисление и другие разделы современной математики»⁶⁶.

⁶⁶ Там же. С. 255.