

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Научный совет по теории машин и систем машин

А. Н. БОГОЛЮБОВ

ТЕОРИЯ
МЕХАНИЗМОВ
И МАШИН
В ИСТОРИЧЕСКОМ
РАЗВИТИИ
ЕЕ ИДЕЙ

2р-04к

611.1109
Б-412



43450

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1976

ГЕНЕЗИС НАУКИ О МАШИНАХ

Человек начал строить машины уже несколько тысячелетий тому назад, а наука о машинах возникла только в середине XVIII в. Истории развития этой науки и посвящена настоящая книга. В ней охвачен большой круг вопросов — от зарождения механики машин и возникновения кинематики до науки о машинах нашего времени. Особое внимание уделено истории развития механики машин в России.

Наука о машинах, истории которой посвящена настоящая книга, возникла подобно другим прикладным наукам в результате промышленного переворота, начало которого относится к 30-м годам XVIII в. Однако машины уже существовали за две с половиной тысячи лет до этой даты, люди работали с ними, улучшали их, строили новые машины, а следовательно, и думали о них. Поэтому первые мысли, высказанные относительно машин, имеют приблизительно такую же давность, слово «механика» происходит от греческого слова *μηχανή*, средневековым латинским вариантом которого является слово *machina* — «машина», машина.

Осмысливание движения было одним из исходных понятий, с которыми пришлось столкнуться человеку в древнейшие эпохи его существования. Оценка траектории полета камня или палки, обработка камня, становящегося орудием, оценка силы удара, использование вращательного движения для добывания огня и для облегчения перетягивания тяжестей — все это постепенно увеличивало запас знаний человека относительно движений и сил. Эти знания передавались от поколения к поколению.

Орудия, облегчавшие человеку жизнь и его влияние на окружающую природу, постепенно усложнялись. Они специализируются, появляются топор, скребок, серп, бумеранг; изобретение последнего предполагает уже понимание пути полета, траектории. Человек изобретает лук и стрелы, пращу, зернотерку, сперва с возвратно-поступательным движением верхнего камня, а затем и с вращением его; так возникла ручная мельница. Тогда же возникают гончарный круг, ткацкий станок и иные сложные приспособления.

В III и, наконец, в IV или V столетии до н. э. где-то на горных речках Малой Азии или Закавказья появляются во-

данные мельницы — первые машины в истории человечества. Водяная мельница, даже в самой элементарной ее форме, представляет из себя машинный агрегат непрерывного действия, состоящий из двигателя (водяное колесо), передачи (цепочное зацепление) и рабочего органа (жернова).

Значительно раньше появились «простые машины», т. е. простейшие подъемные приспособления. Два из них — рычаг и клин (скребок, топор, собственно клин) — были найдены еще в эпоху палеолита. Издревле была известна и наклонная плоскость; в начале III тысячелетия до н. э. в Египте знали лишь рычаг, клин и наклонную плоскость, с помощью которых и были построены пирамиды.

В эпоху же палеолита появляются и первые кинематические приспособления — ловушки для диких зверей, «срабатывавшие», когда зверь наступал на «ведущее звено». С течением времени эти ловушки развились в довольно сложные конструкции, в которых учитывались упругость звеньев, их взаимное расположение, вес животного. На стенах ряда пещер Южной Европы сохранились изображения таких ловушек; подобными ловушками пользуются некоторые отсталые племена и в настоящее время.

В III тысячелетии до н. э. появляется колесо; около VIII в. до н. э. начинают применять блок для подъема тяжестей: он изображен на одном из ассирийских барельефов.

К тому же времени относится изобретение первых водоподъемных приспособлений — ворота, на барабан которого наматывается канат с прикрепленным к последнему сосудом для воды, и журавля, древнейшего предка подъемных кранов; позже была изобретена нория. В середине I тысячелетия до н. э. в храмах Ближнего Востока появились и более сложные механические устройства — автоматы, секрет которых хранился от непосвященных. Намек на автоматы имеется и у Гомера¹.

Итак, в первой половине первого тысячелетия до н. э. в странах средиземной ойкумены имелись уже некоторые

познания из области практической механики. Около VII в. до н. э. возникают греческие города-государства — полисы. Центральное положение Греции в восточной части Средиземноморья, изрезанность берегов, большое число населенных островов — все это содействовало быстрому развитию греческой культуры. Греки усвоили и переработали познания, заимствованные у народов Малой Азии, Египта, с которыми они имели постоянный контакт. Однако механическая техника развивалась медленно: рабовладельческое общество не было заинтересовано в повышении производительности труда — наличие рабов давало возможность увеличить выработку средств потребления за счет дополнительной рабской силы. Это породило даже пренебрежительное отношение к «механическим искусствам».

Греческий философ Платон (427—347 до н. э.) противопоставлял «искусства механические, рабские» свободным искусствам. Однако он не мог не признать, что первые могут оказаться полезными при обороне страны и спасении государства от врагов.

На это у него были основания. Около V в. до н. э. на основе использования принципов пращи и лука появляются первые военные машины.

В середине IV в. до н. э. на севере Балканского полуострова консолидировались македонские племена, стоявшие на более низкой ступени культуры, чем греки. Однако Македонское государство обладало военным могуществом, чего не имели разобщенные и враждующие между собой миниатюрные греческие полисы. В 356 г. царь Филипп II Македонский начал завоевание Греции, вступая в союз с одними полисами, подкупая другие, захватывая земли третьих. В 337 г. Филипп собрал представителей всех полисов в Коринфе на так называемый панэллинский конгресс, на котором было принято решение о создании общегреческого союза под главенством Македонии.

В 336 г. Филипп умер; ему наследовал Александр Македонский (336—323 до н. э.), которому удалось разгромить Персидскую империю, захватить всю Малую Азию, покорить Палестину и Египет, Персию, Среднюю Азию и часть Индии.

Огромное государство, созданное Александром, оказалось непрочным и распалось сразу же после его смерти. Однако греческий язык и греческая культура распространились на территории всей Передней Азии, вплоть до Ган-

¹ [Гефест] «...толстым жезлом подпираясь, в двери
Вышел хромая; прислужницы, под руки взявши владыку,
Шли золотые, живым подобные девам прекрасным,
Кои исполнены разумом, силу имеют и голос
И которых бессмертные знанию дел обучили».

Гомер. Илиада. Одиссея. М., 1967, с. 317.

га, и в Египте и стимулировали мощный всплеск культуры во всех этих странах. Возникла культура, получившая название эллинистической (от слова *Ἑλλάς* — Греция), создателями которой были все народы средиземноморской ойкумены.

Честь заложения основ современной науки принадлежит греческим ученым; их дело продолжили ученые эллинистических стран. Но это не значит, что наука была создана на пустом месте: поколения по крохам собирали в своей памяти наиболее ценное из опыта своих предшественников и передавали это своим потомкам. Поэтому корни наук уходят в бесклассовое первобытное общество; основанием для развития науки явились наблюдения и опыт.

Механика первобытного человека была достаточно обширной: зернотерка, лук со стрелами, праща, бумеранг, затем ткацкий станок, ручная мельница, гончарный круг. Из простых машин древнейшими являются рычаг и наклонная плоскость. Клин лежит в основе всех орудий первобытного человека: топор, нож, скребок, игла — все это варианты клина. Позже начинают применять каток; в 1580 г. до н. э. египтяне заимствовали у гиксосов четырехколесные боевые колесницы. В начале I тысячелетия до н. э. появляется блок, а затем ворот. Уже во второй половине тысячелетия, в V—IV вв. до н. э., изобретают зубчатое колесо (скорее, колесо с цевками) и винт.

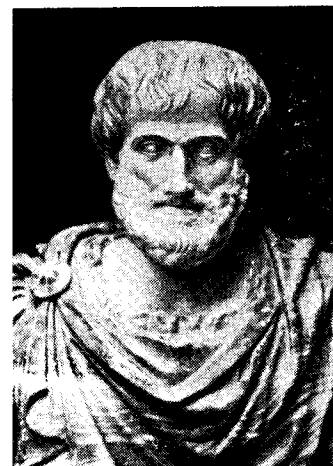
Древнейшие цивилизации возникают с изобретением письма и, вероятно, немного раньше. Древнейшие цивилизации возникли в бассейне Средиземного моря: Египет, Шумер, затем Вавилон и Ассирия, Финикия и Иудея, Крит и Микенская культура Греции. Позже выходит на историческую арену Индия и среднеазиатские культуры; около 1400 г. до н. э. в результате влияния Индии и малоазиатских культур происходит становление китайской цивилизации, которая в свою очередь влияет на возникновение новых дальневосточных культурных центров. Интересно, что в течение длительного времени техническая (ремесленная) традиция в своем развитии не пересекается с научной: у каждой из них находится свое поле деятельности и каждая идет своим путем. Однако эти пути сперва идут почти параллельно — и тут и там господствует рецептура: вавилонская и египетская математика рецептурны, но рецептурны и соответствующие ремесла. Лишь в Греции, когда в связи с экономическим развитием рабовладельче-

ского общества «философы», т. е. ученые-универсалы, получили возможность заниматься наукой профессионально, возникает наука наблюдения и рассуждения.

Элементы рассуждений из области механики у древнегреческих философов одновременно с зачатками науки вообще. Первый из философов, о котором имеются исторические сведения, Фалес Милетский, жил в начале VI в. до н. э.; был он военным инженером и гидротехником, а следовательно, не сторонился ремесла. Он познакомил греков с познаниями египтян и вавилонян; у него есть и рассуждения о сущности движения. В этом же направлении размышляли Гераклит Эфесский (начало V в. до н. э.), Зенон Элейский (510—440 до н. э.), Демокрит Абдерский (ок. 470 — нач. IV в. до н. э.). Однако механика как наука ведет свое начало от великого ученого и философа Аристотеля (384—322 до н. э.), ученика Александра Македонского. Аристотель исследует понятие движения, к которому относит и качественное изменение. Первопричиной движения он считает силу (или мощность), не определяя этого понятия. Движения и силы он складывает по правилу параллелограмма, он знает понятие скорости и сопротивления среды.

Первое из дошедших до нас сочинений, в котором наряду с теоретическими рассуждениями были и прикладные задачи, приписывалось Аристотелю, но на самом деле было написано не раньше начала III в. до н. э. Это сочинение — «Механические проблемы» — содержит сведения всех задач с простыми машинами к одному принципу — к принципу рычага.

В V или в IV в. до н. э. на горных речках Малой Азии и Финикии появляются водяные мельницы — первые настоящие машины, которые знает человечество. Конструкция их была очень простой: на валу водяного коле-



Аристотель

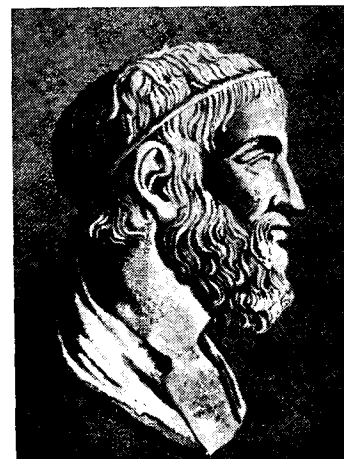
са было закреплено цевочное колесо, находившееся в зацеплении со вторым зубчатым колесом, вал которого был расположен под прямым углом относительно первого вала. Таким образом, получалась некоторая коническая цевочная передача. На валу второго колеса был закреплен подвижной жернов, вращавшийся относительно неподвижного: эта конструкция не изменялась в своей сущности на протяжении следующих двух с лишним тысяч лет.

Иначе было с военной техникой. В древности были выработаны несколько типов машин: катапульты и баллисты — тяжелые орудия, бросавшие камни за счет энергии закрученных сухожилий; онагры — более легкие орудия, смонтированные на подвижной раме, действие которых основано на подобном принципе; скорпионы — усовершенствованные луки с механизированным натягиванием тетивы. Были также попытки использовать в качестве упругого элемента сжатый воздух. Особенного развития военная техника достигла во время войн между эллинистическими государствами и между Римом и Карфагеном.

Рим появляется на мировой исторической арене на рубеже V и IV вв. до н. э., сначала это была глухая провинция где-то на задворках греческой ойкумены. Однако к середине III в. до н. э. Рим уже смог захватить всю Италию и вступить в борьбу за господство на Средиземном море с другой приморской державой — Карфагеном, финикийской колонией на Африканском побережье (в районе современного Туниса). Греческие колонии в Сицилии приняли сторону Карфагена, поэтому им пришлось столкнуться с Римом. Во время одной из войн был убит Архимед — величайший математик и механик в истории человечества.

Архимед (287—212 до н. э.) родился, жил и погиб в Сиракузах — важнейшей греческой колонии на восточном берегу Сицилии. Он занимался арифметикой и геометрией, вплотную подошел к созданию интегрального исчисления, чем опередил свое время более чем на две тысячи лет, очень много сделал в механике — статике, гидростатике, в практической механике. Им было создано много механизмов, в том числе планетарий — прибор, показывавший движение небесных светил, усовершенствовал зубчатое зацепление, изобрел винт и применил винт для подачи воды. Он построил также много машин, в том числе военных. Сам Архимед, пишет Плутарх, «считал сооружение ма-

шин занятием, не заслуживающим ни трудов, ни внимания; большинство их появилось на свет как бы попутно, в виде забав геометрии, и то лишь потому, что царь Гиерон из честлюбия убедил Архимеда хоть ненадолго отвлечь свое искусство от умозрений и, обратив его на вещи осязаемые, в какой-то мере воплотить свою мысль, соединить ее с повседневными нуждами и таким образом сделать более легкой и ясной для большинства людей. Знаменитому и многими любимому искусству построения механических орудий положили нача-



Архимед

ло Эвдокс и Архит, стремившиеся сделать геометрию более красивой и привлекательной, а также с помощью чувственных, осязаемых примеров разрешить те вопросы, доказательство которых посредством одних лишь рассуждений и чертежей затруднительно; такова проблема двух средних пропорциональных — необходимая составная часть многих задач, для разрешения которой оба применили механическое приспособление, строя искомые линии на основе дуг и сегментов. Но так как Платон негодовал, упрекая их в том, что они губят достоинство геометрии, который от бестелесного и умопостигаемого опускается до чувственного и вновь сопрягается с телами, требующими для своего изготовления длительного и тяжелого труда ремесленника, — механика полностью отделилась от геометрии и, сделавшись одной из военных наук, долгое время вовсе не привлекала внимания философии².

Архимед руководил обороной Сиракуз во время осады их римлянами; с помощью его машин римлянам был нанесен ощутительный урон. В день падения Сиракуз Архимед был убит римским солдатом.

² Плутарх. Сравнительные жизнеописания, т. I. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 391.

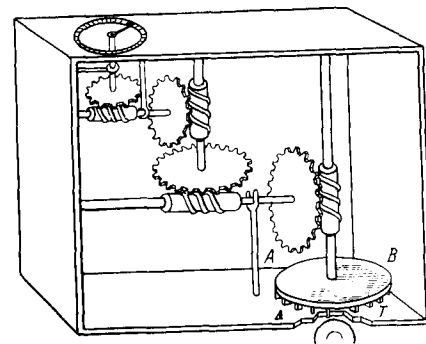
Некоторые направления творчества Архимеда были продолжены эллинистскими геометрами. В частности, Никомед (ок. 150 г. до н. э.) разрабатывал теорию кривых. Он изобрел конхоиду — кривую, представляющую собой геометрическое место точек, расстояния которых от данной прямой, считаемые по прямым, проходящим через данную точку, имеют постоянную величину. Впрочем, название «конхоида» этой кривой присвоил значительно позже византийский математик Прокл (410—485). Никомед изобрел также прибор для черчения конхоиды.

Приблизительно с III в. до н. э. важнейшим культурным центром Средиземноморья становится Александрия — столица эллинистического Египта, а затем египетской провинции Римской империи. Здесь в стенах музея и библиотеки работали поколения замечательных математиков и механиков, которые продолжили научное творчество Архимеда, а также многовековый опыт египетских жрецов. Особенную известность получили три александрийских механика — Ктесибий, Филон и Герон³.

Ктесибий (300—230 до н. э.) был одним из самых замечательных изобретателей, которых знало человечество. Парикмахер по специальности, он самообразованием достиг глубоких познаний в механике. Он изобрел пожарный насос (причем классическая форма поршневого насоса принадлежит ему же), создал ряд гидравлических и пневматических механизмов, изобрел аэротон — военную машину, в которой роль упругого тела играл сжатый воздух, водяной орган, усовершенствованные водяные часы. Есть сведения, что он написал книгу о своих изобретениях.

Филон Византийский жил, по-видимому, поколением позже Ктесибия, поэтому его следует отнести ко II в. до н. э. Он работал над некоторыми изобретениями, следуя Ктесибию. Он умел изготавливать пружины из бронзы и применил в своих механизмах так называемый карданов шарнир. Им был написан труд по механике в 9 книгах, из которых до нас дошли 4-я и 5-я и отрывки из 7-й и 8-й.

Ученик Филона Герон Александрийский (начало I в. до н. э.) написал несколько сочинений по механике, в том числе «Механику», «Книгу о подъемных машинах» («Барилкон»), «Пневматику», «Книгу о военных машинах», «Театр автоматов». «Барилкон» сохранился в позднейшем



Счетчик оборотов Герона (реконструкция)

изложении Паппа Александрийского и в арабском переводе, «Театр автоматов» — в оригинале и в переводах; об остальных дошли либо фрагменты, либо только названия. Термин «простые машины» и предположение о том, что все сложные машины состоят из простых, бытовавшие до XVIII в., связаны с неправильным пониманием Герона, который имел в виду именно не простые машины, а простые приспособления. Он говорит: «Для подъема тяжестей существует только пять приспособлений (*δυνάμεις*): ворот, рычаг, полиснасть, клин и винт». При исследовании действия рычага Герон пользуется понятием момента, введенным у Архимеда; он применяет это понятие и к другим приспособлениям. Он дает теорию «простых машин», сообщает об их применении к ряду технических задач, о том, как их следует сочетать при подъеме больших грузов, делает численные подсчеты. При работе со сложными механизмами Герон рекомендует несколько увеличивать силы, сравнительно с определенными по расчету, но численно этого увеличения он не оценивает.

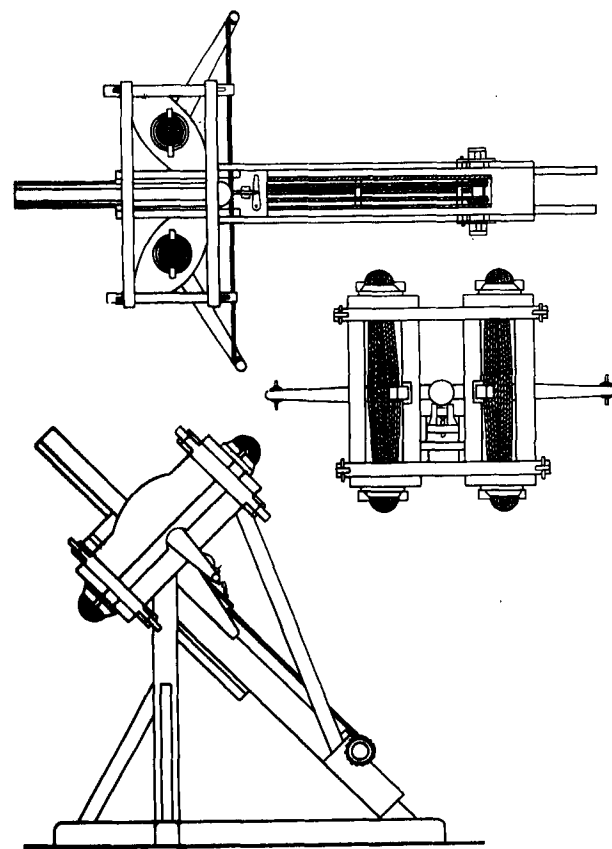
В «Театре автоматов» содержится несколько его изобретений: геронов шар — прообраз паровой турбины реактивного действия, геронов фонтан и др. В книге описываются главным образом храмовые театральные автоматы. Как говорит Герон, «представления автоматических фонтанов пользовались в старину большой любовью, во-первых, потому, что в устройстве их проявлялось много механического искусства, а затем и потому, что самое пред-

³ A. G. Drachmann. Ktesibios, Philon and Heron. Copenhagen, 1948.



Водяная мельница (по Витрувию)

ставление бывало поразительно. Ибо как раз при устройстве автоматов для различных деталей их приходится применить все отдели механизмы. Следовательно, уже во времена Герона автоматы были не новым делом, а так как для их построения нужно иметь познания из области статистики, разбираться в механизмах и их деталях, уметь производить вычисления, знать пневматику и гидравлику и уметь работать с гибкими и упругими телами, то приходится прийти к заключению, что мы скорее склонны недооценивать познания древних, чем переоценивать их.



Палантонон (реконструкция)

К механике эллинистических стран примыкает механика Карфагена и Рима, находившаяся там примерно на одном уровне. В сочинении по сельскому хозяйству Катона Старшего (234—149 до н. э.) содержатся сведения по прессам для выработки оливкового масла и виноградного сока. Катон описывает рычажные прессы; описание последних мы находим также в работе Плиния Старшего (23—99 до н. э.). Полное подробное сведения о практической механике времени Августа (1 в. до н. э.) можно получить из сочинения архитектора и инженера Марка Витрувия Поллиона

«Об архитектуре». Книга X трактата, посвященная «основам механики», содержит описание машин и механических приспособлений и их действия. Машину Витрувий определяет как «прочное соединение деревянных частей, предназначенное для передвижения тяжелых грузов и приводимое в движение искусственным образом по кругу, что греки называют круговым движением». Витрувий различает машины и орудия. Машины — это те приспособления, которые требуют для приведения их в действие большого числа рабочих или большой силы, орудия же приводятся в действие силой одного человека. Витрувий рассматривает подъемные машины, применяемые на строительных, водоподъемных машинах, водяную мельницу. Сравнивая работу последней с работой водоподъемного колеса, Витрувий пишет: «Таким же образом вертятся водяные мельницы, в которых все то же самое, кроме зубчатого барабана, насаженного на один конец оси. Вертикально поставленный на ребро, он вращается в одной плоскости с колесом. К этому большому барабану примыкает меньший, лежащий, тоже зубчатый, с которым соединены жернова. Так зубцы барабана, насаженного на ось, толкая зубцы лежащего, приводят жернова во вращение»⁴.

Почти половина книги Марка Витрувия (главы 10—16) посвящена описанию военных машин и прочей военной техники.

К этому времени военные машины достигли большого разнообразия и совершенства. Работали они, как правило, за счет энергии, накапливаемой при закручивании упругого элемента, в качестве которого применялись сухожилия или волос, большей частью женский, как указывает Витрувий. Баллисты и катапульты, конструкция которых была подобной, применялись для метания камней, бревен, стрел. Строились они в большом количестве, и конструкции их разрабатывались тщательно. В качестве основания для расчетов бралась толщина пучка жил, называемая модулем катапульты, или вес снаряда (*qua libra* — сколько фунтов? — отсюда «калибр»). Так, например, катапульта «в один талант» (талант — около 26 кг) метала камни соответственного веса, длина ее равнялась 7,6 м, высота — около 7 м. При обороне Сиракуз Архимед строил катапульты в

три таланта, которые метали камни почти в центнер весом на расстояние в 1 стадий (около 185 м.).

Последним из известных александрийских механиков был Папп, живший в IV в. н. э. Механике посвящена небольшая книга его «Математического собрания». Он различает теоретическую и практическую механику; к первой он относит результаты, связанные с арифметикой, геометрией, физикой и астрономией, к практической же — все то, что относится к обработке меди, железа, дерева, к строительному делу, живописи и к иным ремеслам. Он описывает построение военных машин, строительных машин, автоматов, рассматривает подъем тела по наклонной плоскости и порождению с помощью зубчатых колес. Он доказывает, в частности, что скорости вращения двух зубчатых колес обратно пропорциональны числам зубьев колес и что числа зубьев относятся как диаметры колес. Важное место в его работе занимает учение о центре тяжести, которое он излагает по Архимеду и Герону с собственными дополнениями.

В IV—V вв. н. э. началось Великое переселение народов. Около 372 г. в Европу вторглись гунны, под ударами которых германские племена двинулись на юг и запад, перейдя в нескольких местах границу Римской империи. В IV в. империя разделилась на две части: восточную и западную. Слабая западная империя не смогла противостоять напору германцев, которые проникли и в самую Италию; в 476 г. герул Одоакр лишил власти последнего римского императора — малолетнего Ромула Августула.

Рабовладельческое общество к этому времени находилось в состоянии глубокого кризиса: города пустели, ремесло и торговля замирали, наука и техника оказались в состоянии упадка.

Восточноримская, или Византийская, империя продолжала существовать значительно дольше: до VII в. она контролирует Балканский полуостров, Малую Азию, Египет, иногда Византию и Северную Африку, даже часть Италии. Затем она слабеет и в 1456 г. исчезает с карты Европы под ударами турецких завоевателей.

Уровень знаний в области математики и практической механики в Византии был относительно высоким. Известно, что в Константинополе был арсенал Мангана с большим числом военных машин. Механик Герон Младший (конец VII в.) написал труд о военной технике. Иоанн

⁴ Витрувий. Десять книг об архитектуре. Пер. Ф. А. Петровского. М., Изд-во Всесоюзной академии архитектуры, 1936, с. 199.

Филопон из Александрии (ум. ок. 660 г.) работал в области механики, математики и оптики. Он указал, в частности, что движение в пустоте легче, чем в воздухе. В 532—537 гг. архитекторы и механики Исидор Милетский и Анфимий Тральский соорудили знаменитый храм Софии (длина — 140 м, ширина — 72 м, высота — 54 м, диаметр основания купола — 31,4 м). При его возведении были использованы различные подъемные машины. В конце X в. во время землетрясения купол храма разрушился, и его впоследствии отстроил знаменитый армянский архитектор Трдат.

Выдающимся ученым в области математики и практической механики был Лев Математик (ок. 815 — ок. 870), по происхождению армянин. С 838 по 840 г. он преподавал в столичном университете, в 843 г., после некоторого перерыва, вернулся туда же и в 863 г. стал его ректором. Он создал интересную систему механизмов для императорского дворца: около трона поставил золотых львов и птиц, которые во время торжественных аудиенций начинали двигаться, что производило на варварских властителей сильное впечатление. Можно сказать, что александрийское искусство построения автоматов было развито византийскими механиками.

Около середины V в. в связи с религиозными и социальными движениями в Византии начался процесс деэллинизации малоазиатских народов и возрождения национальных языков, и культурные центры стали перемещаться на Восток. В 489 г. император Зенон закрыл несторианскую школу в Эдессе и изгнал несториан; последнио нашли убежище в Персии. В 529 г. Юстиниан закрыл Академию неоплатоников в Афинах, и те опять же переселились в персидские пределы. По желанию персидского царя Хосрова I (531—578) в Юнди-Шапуре была создана академия, подобная александрийской. Таким образом влияние позднеэллинистической культуры распространилось и на Восток, проникнув в пределы Армении, Грузии, Албании (Азербайджана), Хорезма вплоть до Индии. Это было облегчено и тем, что в Средней Азии и северной Индии еще чувствовалось культурное влияние старого эллинизма, проникшего туда вместе с завоеваниями Александра Македонского и его преемников. С IX в. начинается византийское культурное влияние и на Киевскую Русь.

В начале VII в. в Аравии началось религиозно-политическое движение, известное под названием ислама. В течение VII в. арабы покорили ряд провинций Византийской империи. До 640 г. были завоеваны Сирия и Палестина, к концу 642 г. — Египет, в 651 г. — Персия; в начале VIII в. Афганистан и Белуджистан, северная Африка и Закавказье. В 711 г. арабский полководец Тарик высадился на берегах Испании и начал завоевание Иберийского полуострова. В арабский халифат со столицей в Багдаде входило много стран и много различных народов, объединенных религией — исламом и арабским языком религии, науки и культуры.

Источниками науки арабоязычных стран были как труды ученых классической древности и византийских ученых, так и опыт самих народов, вошедших в состав Халифата. На арабский язык были переведены сочинения Аристотеля, Герона Александрийского, Филона Византийского, Иоанна Филопона. Важный вклад в науку приподлежит среднеазиатским ученым, в частности хорезмийцам. Даже слово «алгоритм» есть не что иное, как латинский вариант имени знаменитого математика, труды которого лежат в основе арифметики и алгебры, Мухамеда ибн-Мусы ал-Хорезми (IX в.).

Важный вклад в математику внес великий ученый-энциклопедист Абу Рейхан ал-Бируни (973—1048). Знаменитый Авиценна (Ибн Сина, 980—1037) развивал учение Иоанна Филопона о движении. Он считал, что сила, приданная движущемуся телу, не уничтожается и что, если бы не было помех движению, оно продолжалось бы бесконечно долго. В трактате «Мерило разума» Ибн Сина творчески переработал труды Псевдо-Аристотеля и Герона и внес в них существенные дополнения. Кроме простых машин он рассматривает также некоторые весьма остроумные их сочетания, служащие для подъема тяжестей⁵. Абу Юсуф ал-Хорезми (X в.) во второй книге своих «Ключей наук» одну из глав посвятил механике: он излагает здесь содержание «Механики» и «Пневматики» Аристотеля.

⁵ М. А. Давидов. Трактат Абу Ибн Сины «Мерило разума», его сравнение с трактатами Аристотеля и Герона. — В кн.: Из истории точных наук на средневековом Ближнем и Среднем Востоке. Ташкент, «Фан», 1972, с. 42—57.

Более самостоятельными являются трактаты «Книга о познании инженерной механики» Исмaила ал-Джазари (XII—XIII вв.) и «О водяных колесах и подъеме воды и служащих для этого механических устройствах» Мухамеда ал-Хурасани.

Переводились и труды Архимеда. В частности, Сабит ибн Корра (836—901) перевел некоторые его математические сочинения. Под именем ибн Корры известен трактат о весах «Книга о карастуне», где излагается теория римских весов, которые рассматриваются как неравноплечный рычаг.

Значительная часть стран, входивших в состав Халифата, существовала в условиях поливного земледелия, и ирригация была здесь важнейшим делом. Было придумано много машин для ирригации: черпальные машины, называемые зурнук и далийя, приводимое в движение водой черпальное колесо — наура, а также более сложные машины.

Водяные мельницы достигли в странах Халифата такого распространения, что о ручном помоле зерна забыли. На многих реках строились плавучие мельницы, чтобы лучше и наиболее полно использовать энергию воды. Для привода мельниц использовался даже прилив: так, в Басре, в устьях каналов, почти целиком питавшихся водой за счет прилива, были построены мельницы. Много мельниц было поставлено на реке Тигре, в районах Багдада и Мосула. Мосульские мельницы имели по два постава; багдадские были крупнее: самая большая из них имела 100 поставов.

В VIII в. в Персии и в Месопотамии появляются ветряные мельницы различной конструкции. Имеются сведения о ветряных колесах типа турбины: вертикальные крылья устанавливались вокруг вертикально поставленного вала, вращавшего подвижный жернов. В этом случае отсутствовала передача, и конструкция установки становилась проще. Ал-Гузули (ум. 1412) пишет, что скорость вращения вала регулировалась: «В Афганистане все мельницы и водочерпальные колеса приводятся в движение северным ветром и поэтому ориентированы только по нему. Этот ветер дует там постоянно, летом и зимой, однако сильнее и упорнее летом... На мельницах у них устроены люки, которые открываются и закрываются, чтобы ветра попадало то больше, то меньше. Потому что,

когда он дует слишком сильно, мука горит и выходит черной, порой даже жернов раскаляется и разваливается в куски»⁶.

Наследие арабоязычных стран в области математики и механики различными путями было передано в Западную Европу. Одним из важнейших путей такой передачи стала Испания.

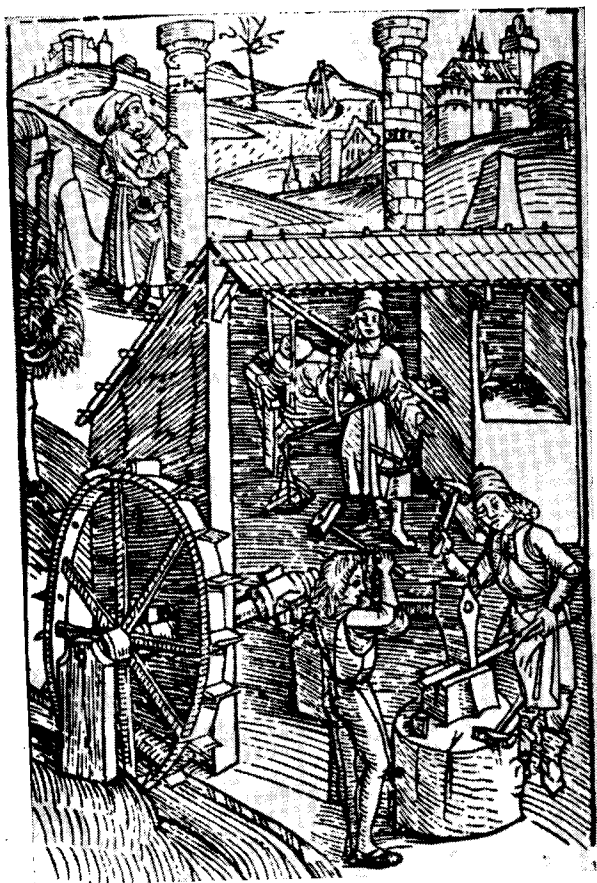
Мы видели, что в начале VIII в. происходило завоевание Испании арабами. Однако в Бискайе, Галиции и Астурии остались центры сопротивления, ставшие катализаторами борьбы с завоевателями — «реконкисты», возвращения родины. Впрочем, арабы быстро смешались с местным населением, и борьба приняла форму религиозной войны между испанцами-христианами и испанцами-мусульманами.

Расцвет науки в арабской Испании происходил в X в. В это время были выполнены переводы сочинений греческих и эллинских ученых на арабский язык и созданы самостоятельные математические работы. В 30-х годах X в. в Кордовской академии преподавал Мослема ал-Махриси, уроженец Мадрида, крупнейший математик арабоязычной Испании: он познакомил арабо-испанцев с трудами ал-Хорезми. В те же годы усилились мирные контакты между обеими частями Испании; северные испанцы посещают арабо-испанские школы, начинается интенсивная работа переводчиков. Одним из первых, кто познакомил Западную Европу с арабской математикой, был бенедиктинский монах Герберт Орилакский⁷. Он является также одним из изобретателей механических часов.

Развитие механики в Западной Европе от VII по XVIII в. происходило двумя различными путями, почти не пересекавшимися: практики непрерывно совершенствуют свои машины, изобретают новые, строят сооружения

⁶ Цит. по кн.: А. Мец. Мусульманский ренессанс. М., «Наука», 1966, с. 363.

⁷ Герберт Орилакский (Gerbert d'Aurillac, ок. 938—1003) родился в крестьянской семье, учился в монастыре. С 967 по 970 г. учился в Испании, где познакомился с арабской наукой. Участвовал в переводах книг, вводил индийские (арабские) цифры. С 970 по 972 г. преподавал в Риме, затем переехал в Реймс, где развил бурную педагогическую и литературную деятельность. В 999 г. избран папой под именем Сильвестра II. Умер 12 мая 1003 г. (по видимому, был отравлен).



Железодельная мельница

и мосты, мельницы и военные машины. Теоретики работают над созданием теоретической механики, они часто связаны со школьной наукой. И подобно тому как в Греции существовало взаимное недоверие между философами-теоретиками и механиками-практиками, так и между учеными-схоластами и инженерами-практиками согласия не заметно: каждый работает сам по себе и редко считается с опытом или знаниями других.

Механическая техника, полученная европейскими народами в наследство от Римской империи, была не особенно разнообразной: подъемные строительные машины, некоторые горные машины, насосы, военные машины, водяные мельницы для помола зерна. Развивающееся городское строительство потребовало совершенствования подъемных машин, появляются краны⁸. Растущие потребности населения стимулировали рост количества мельниц: если в VI в. в европейских странах они насчитывались единицами и десятками, то в XII в. их были уже сотни в каждой стране, а в XIII в. — тысячи. Так, в Англии в XI в. насчитывалось свыше 5600 водяных мельниц. В XII в. в Европе впервые появились ветряные мельницы, которые быстро распространились по всем странам.

Основное назначение мельниц — помол зерна. Однако в Европе к началу II тысячелетия н. э. развивается и иное их использование, сперва — производство сукна. В XII — XIII вв. появляются железодельные мельницы, а в XIII в. — гидравлические молоты, мельницы для изготовления бумаги, пыльные мельницы, затем толчеи для изготовления пороха.

Начиная с XIII в. процесс развития и усовершенствования машин идет во все более и более ускоряющемся темпе. Начавшиеся торговые и культурные взаимоотношения с Востоком, явившиеся следствием Крестовых походов, возникновение и рост городов и связанное с этим начало разложения феодального общества, возникновение цехов в городских республиках Северной Италии и распространение их по всей Европе, движение городов к автономии и борьба абсолютных монархов с феодальной «вольницей», а затем великие открытия и появление новых рынков сбыта — все это вызвало новый мощный подъем ремесленного производства, что в свою очередь явилось базой для зарождения мануфактуры. Постоянные войны требовали создания новых, более мощных осадных машин, а городское строительство — улучшения и усовершенствования подъемных механизмов. «Когда после темной ночи средневековья вдруг вновь возрождаются с неожиданной силой науки, начинающие развиваться с чудесной быстротой, то этим чудом мы опять-таки обязаны производству. Во-первых, со

⁸ Термин «кран» (Krahn или Krahnich) средневекового происхождения. Krahnich — журавль, птица с длинной шеей и клювом.

времени крестовых походов промышленность колоссально развилась и вызвала к жизни массу новых механических (ткачество, часовое дело, мельницы), химических (красильное дело, металлургия, алкоголь) и физических факторов (очки), которые доставили не только огромный материал для наблюдений, но также и совершенно иные, чем раньше, средства для экспериментирования и позволили сконструировать *новые* инструменты. Можно сказать, что собственно систематическая экспериментальная наука стала возможной лишь с этого времени. Во-вторых, вся Западная и Центральная Европа, включая сюда и Польшу, развивалась теперь во взаимной связи, хотя Италия благодаря своей от древности унаследованной цивилизации продолжала еще стоять во главе. В-третьих, географические открытия, произведенные исключительно в погоне за наживой, т. е. в конечном счете под влиянием интересов производства, доставили бесконечный, до того времени недоступный материал из области метеорологии, зоологии, ботаники и физиологии (человека). В-четвертых, появился *печатный станок*⁹.

XIII век нес с собой уже предчувствие Возрождения. На протяжении всего столетия идет ожесточенная борьба западноевропейских властителей с властями Ближнего Востока. В течение этой, последней фазы крестовых походов «латиняне» были вытеснены из Сирии и Палестины. Но зато в 1204 г. ими был взят и разграблен Константинополь и захвачены владения Византии в Греции: на развалинах Византийской возникла Латинская империя. Встречу с монголами приняла на себя Киевская Русь, своей грудью защитившая Европу от монгольского нашествия: в 1240 г. был взят и разграблен Киев. Церковь потеряла свою монополию на образование: если в конце XII в. из внешних монастырских школ возникли четыре университета (Болонский, Парижский, Кембриджский и Оксфордский), то в XIII в. к ним добавляются университеты Падуи, Пизаны, Салерно, Орлеана, Тулузы, Саламанки и Коимбры. Среди византийских ценностей, украденных крестоносцами, были и греческие рукописи, и ученые трактаты. Возникает готическое искусство: готическая архитектура требует более мощных подъемных приспособ-

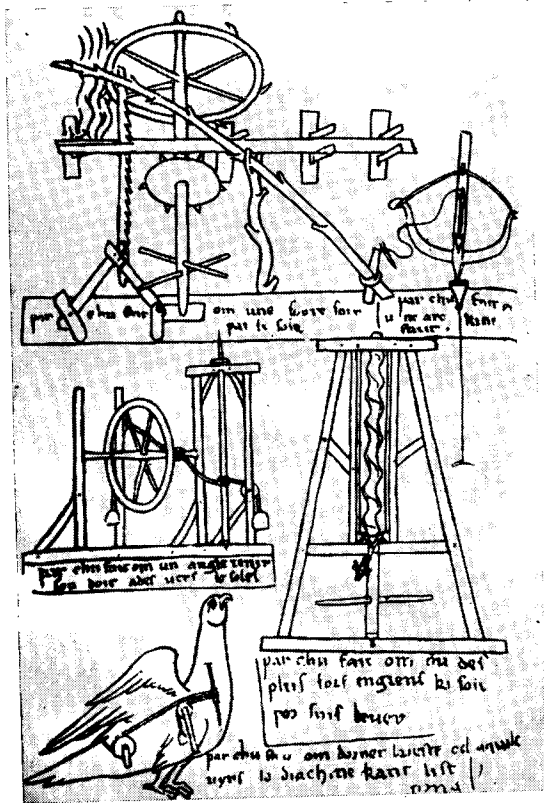
лений, чем романская, ей предшествующая, да и сама требует весьма серьезных познаний в практической механике. «Можно сорвать с римского сооружения все его украшения, лишить его внешних форм, и все же не возникнет сомнений относительно его конструкции... Но немислимо отнять у здания XIII в. его декоративные формы или заменить их другими, не нарушая его прочности, не повредив его, если так можно выразиться, организма. Этот вполне понятный принцип, который легко обнаружит каждый при внимательном рассмотрении архитектуры того времени, говорит нам о том, что, несмотря на внешнюю сложность, искусство XIII в. создано так, что оно легко поддается требованиям, выдвигаемым иной раз конструкцией, иной раз внешними условиями»¹⁰.

Численный и качественный рост машин вызвал к жизни и соответствующую литературу: в XIII в. начинают появляться трактаты о машинах. Около 1235 г. был написан трактат Виллара де Гоннекура, сохранившийся в рукописи. Он содержит, в частности, чертеж и описание нильной мельницы, включающей механизм шарнирного четырехзвенника. В той же рукописи есть описание проекта колесного вечного двигателя. В том же столетии появляются и иные предложения вечного движения, например проект Пьера де Марикура (Пьер Перегрин, 1265), который решил для этого воспользоваться магнитами. Интересные мысли о возможностях машин высказал знаменитый философ и ученый Роджер Бекон¹¹. В своем «Письме о секретных вещах» он писал: «Можно построить такие машины для плавания без весел, что самые большие корабли на реках или морях, управляемые только одним человеком, понесутся с невероятной скоростью, большей, чем если бы их обслуживали полные экипажи. Можно также построить такие повозки, которые понесутся с громадной быстротой

⁹ Э. Э. Виолле ле Дюк. Беседы об архитектуре. М., Изд-во Всесоюзной академии архитектуры, 1937, с. 276.

¹¹ Роджер Бекон (Roger Bacon, 1214? — 1294?) учился в Оксфорде, потом в Париже. В 1250 г. вернулся в Оксфорд, вступил в орден францисканцев. Производил опыты по оптике и химии, чем вызвал подозрение в занятиях «черной магией». Вскоре после возмущения в Париже, в 1257 г., был заключен в тюрьму, откуда его выпустили в 1265 г. Вторично он находился в заключении с 1278 по 1292 г. Один из первооткрывателей опытной науки, Бекон считал, что «невозможно прийти к правильному пониманию вещей этого мира без математики».

⁹ Ф. Энгельс. Дialeктика природы. М., Госполитиздат, 1969, с. 157—158.



Пильная мельница (по рукописи Виллара де Гоннекура)

без помощи животных; таковыми были, как представляется нам, скифские повозки, на которых сражались древние. Можно построить и летающие машины, так что человек, сидя внутри ее, управлял бы двигателем, при помощи которого искусственные крылья рассекали бы воздух подобно летающим птицам. Можно также построить машину небольших размеров для подъема больших грузов, что будет весьма полезно в необходимых случаях. А с помощью машины в три пальца высотой и шириной, и меньшего размера, человек мог бы освободиться сам и освободи-

ть своих друзей от любой опасности тюрьмы и подъема и спуска. Можно также легко построить машину, с помощью которой один человек сможет подтянуть к себе тысячу других, вопреки их воле, и подобным же способом притянуть иные вещи. Можно также соорудить машины для путешествия в море и в реках, спускаясь без опасности даже до дна. Ибо, как рассказывает астроном Этикус, такой машиной воспользовался Александр Великий для осмотра морских тайн. Такие машины строили в древности и, несомненно, их строили и в наше время, за исключением, возможно, летающей машины, которой я не видел и не знаю ни одного человека, который бы ее видел, однако я знаю одного специалиста, который обдумал способ постройки такой машины. И такие вещи можно сооружать почти без предела, например мосты через реки без быков или иных поддержек, и механизмы, и бесчисленно много машин»¹².

Таковы были мечтания этого ученого. Ссылки на авторитет древних обычны в то время; иногда автор произведения даже ставил на нем не собственное имя, а имя какого-либо античного автора, чтобы придать вес своим идеям. Напомним, что авторского права тогда еще не существовало.

Еще один интересный мыслитель жил в Каталонии. Это был Рамон Лулль (1235 — 1315) — испанский схоласт, математические и философские концепции которого изложены в его сочинении «Великое искусство». Основной его идеей было ввести в метафизические спекуляции точные методы расчета. Он полагал также, что все знания являются лишь частными случаями всеобщей науки, которую он и назвал «*Arts magna*» — великое искусство. Лулль первым в истории культуры высказал идею создания вычислительной машины.

Тем временем развитие машин продолжалось. В 1280 г. в Европу попало прядильное колесо, изобретенное, по видимому, в Индии. Оно имело техническое новшество — привод бесконечной лентой. Культура Востока положительно повлияла на развитие европейского ткацкого производства: не только был усовершенствован ткацкий станок, но и изменился характер тканей, распространилось

¹² Цит. по кн.: W. H. G. Armitage. A social history of Engineering. London, 1961, p. 46.

шелкоткацкое производство. Ткацкий станок получил pedalный привод; тем самым энергетическая функция была отделена от технологической, которую все еще выполняли руки.

Растет число механизмов, известных техникам. Привод вóрота породил рукоятку, изогнутую дважды под прямым углом: отсюда уже недалеко и до коленчатого вала, который появился около XIII в. в качестве удобного привода для ручной мельницы. Около 1440 г. появилось маховое колесо; возможно, оно в своей элементарной форме применялось и ранее.

Появление латинских переводов греческих и исламских ученых стимулировало становление европейской науки. Между 1187 и 1260 гг. был написан трактат Герарда Брюссельского «О движении»¹³, в котором рассматриваются понятия средней скорости, равномерного и неравномерного движения. Учение Герарда было развито учеными оксфордской школы — между 1328 и 1350 гг. Вильям Хейтесбери, Ричард Суайнсхед и Джон Дамблтон¹⁴ в ряде трактатов выяснили основные понятия кинематики, понятия равномерного, равномерно ускоренного движения, понятие средней скорости. Они отличают учение о движении от учения о силах, производящих движение, т. е. от динамики.

Динамика начинает развиваться в XIV в.: ученые исходят при этом из учения Иоанна Филопона о полете брошенного тела. Гийом д'Оккам (1280—1347) поставил вопрос о местонахождении двигателя для тела, находящегося в движении. Соответствующая теория — теория «импетуса» — была развита Жаном Буриданом, ректором Парижского университета (1327). Буридан умер в Париже после 1358 г.

Буридан утверждал, что при воздействии на движимое тело двигатель передает ему некоторую мощностъ — «импетус», способный двигать его в нужном направлении. «Импетус» растет вместе со скоростью, он пропорционален плотности и объему тела, к которому приложен.

Некоторые идеи (их можно отнести к кинематике) были высказаны Альбертом Саксонским (Albert de Helmstaedt),

преподававшим в Сорбонне от 1350 до 1361 г.; в 1353 г. он был ректором Парижского университета. Он определил угловую скорость вращения и установил, что скорость падающего тела возрастает пропорционально пройденному пути или пропорционально скорости. Он отклонил оба эти закона, утверждая на основании доктрины «импетуса», что при падении тела сопротивление падению растет быстрее «импетуса» и поэтому ускорение не может возрастать бесконечно, а будет стремиться к некоторому пределу.

Ученик Буридана Николай Орем (Nicole Oresme, ум. 1382) далее развил идеи кинематики: он изучал равномерно ускоренное движение, причем прибегнул к графическому изображению. Он одним из первых развил координатный метод. Таким образом, математики-схоласты к концу XIV в. путем самостоятельных рассуждений создали механические теории, отличающиеся от учения древних. Следует отметить, что, за исключением Аристотеля, древние еще не были достаточно известны на Западе; что касается эксперимента, то о нем уже говорили (например, Роджер Бекон), но им еще не пользовались. Практической механики математики-схоласты сторонились, недаром в средние века само имя механики производили не от $\mu\eta\chi\alpha\lambda\eta$ (орудие, приспособление), а от $\mu\alpha\chi\lambda\omicron\varsigma$ — похоть.

Но практические механики за это время добились существенных результатов. Развивается часовое дело: около 1300 г. Пьер Пипеляр построил башенные часы в Париже; в 1352 г. были созданы астрономические часы страсбургского собора; к 1356 г. относится постройка часов в Нюрнбергской Фрауенкирхе. В 1404 г. в Москве были поставлены городские часы, которые построил афонский монах серб Лазарь. На их циферблате славянскими цифрами были обозначены часы от 1 до 12. Летописец отмечал: «Сей часник называется часомерье. Каждый раз он ударяет молотом в колокол, размеряя и рассчитывая ночные и дневные часы. Но человек ударяет, но человековидно, самозвонно и самодвижно. Удивительно, как то сделано человеческим мастерством, изобретено и придумано».

Профессия инженера (от латинского *ingeniosus* — талантливый и вульгарно-латинского *ingenia* — военная техника) появилась в период раннего средневековья. Профессия эта не была цеховой и прилагалась к разным специалистам: в сущности она означала лишь совокупность знаний, которые могли быть у архитектора, скульп-

¹³ M. Clagett. The Liber de motu of Gerard of Brussels and the origins of kinematics in the West.— «Osiris», 1956, v. XII, p. 73—175.

¹⁴ M. Clagett. The science of Mechanics in the Middle Ages. Madison, 1960.

тора или художника кроме их основной работы. Сплошь и рядом одному и тому же лицу приходилось строить машины, сооружать укрепления, строить водопроводы, ваять, писать картины и выполнять еще много разнообразных дел. Каждый такой инженер или архитектор должен был иметь познания в механике, без которых его машины могли отказаться в действии, а выстроенные им крепости — не выдержать удара осадной мощи противника.

Основными технологическими машинами продолжали оставаться мельницы, водяные и ветряные, распространение которых все же было неравномерным. И если Дон-Кихот в XVI в., бродя с Санчо Панса по Кастилии, налетел на ветряную мельницу, приняв ее за злоумышленного великана, то это, вероятно, потому, что в том месте, откуда он был родом, в Ла Манче, ветряных Мельниц еще не было. Мельницы были машинами, заменявшими физическую силу человека, поэтому они и применялись на разных несложных технологических операциях, требовавших от исполнителя большой физической силы. То же самое относится и к другим машинам средневековья — военным, строительным (краны), горным и водоподающим: везде машины заменяют силу человека, увеличивая его физические возможности. Военные метательные машины оставались все теми же катапультами, баллистами и скорпионами в нескольких вариантах. Так, фронтисбола представляла из себя метательную машину с противовесом: к короткому плечу рычага, вращающегося на оси, закрепленной в раме, подсоединялся противовес, а длинное плечо служило для закрепления пращи, в которую вкладывался камень. Аркбаллиста была комбинацией мощного лука с лебедкой для натягивания тетивы. Стреляла аркбаллиста стрелами. Более тяжелой машиной для метания стрел была бриколь; в ней использовалась упругость дерева. В начале XIV в., после изобретения пороха, в Европе начинают строить огнестрельное оружие: сперва это были легкие мортиры, стрелявшие камнями. В середине XIV в. огнестрельное оружие попадает и на Русь, по-видимому, двумя путями: с Запада — «арматы», а с Востока — «тюфяки» (тюфяк — по-турецки пушка, ружье). В XIII в. на речках и реках Руси появились водяные мельницы, сперва мукомольные, а затем и технологические.

В XV в. было изобретено книгопечатание. Первый печатник Иоганн Гутенберг (ок. 1399—1468) между 1436 и

1444 гг. изобрел словолитню и печатный пресс, из-под которого в 1455 г. вышла первая книга — 42-строчная «Библия»; в конце XV в. в Кракове выходят первые книги на церковнославянском языке, а в 1517 г. первую книгу напечатал белорусский первопечатник доктор Франциск Скорины. Так, на титульном листе к третьей книге «Царств» изображено сооружение готического собора, видна подъемная машина с лебедкой, распоры и контрфорсы самого здания. В 1563 г. в Москве дьякон Иван Федоров (1525—1583) вместе с Петром Мстиславцем (?—1580) начал печатать первую книгу на Руси — «Апостол».

В XIV в. продолжало развиваться ремесленное производство, но оно постепенно становится монополией членов цехов. Доступ в цехи затрудняется: чтобы стать полноправным членом цеха, мастером, нужно добрый десяток лет пробыть учеником и подмастерьем. Ремесленники же не члены цехов, работающие *a parte* (итальянское — на стороне, отсюда — «партачи»), нещадно эксплуатируются цеховой верхушкой. Последняя вместе с купеческими гильдиями составляет городскую власть, патрициат. Художники всех видов искусств, включая механиков и инженеров, также входят в состав цехов, только их цехи — младшие и их услугами пользуются и монархи, и городской патрициат. Впрочем, платили и те и другие плохо или вообще старались не платить.

Опыт, который накапливался у ремесленников и у художников, естественно, не мог не повлиять и на развитие науки. Среди самих университетских профессоров, схоластов, раздаются голоса о необходимости и в науке пользоваться не только рассуждением, но и опытом. К опыту прибегал Николай Кузанский (1401—1464) — философ и богослов по форме своих сочинений, а по духу и смыслу — математик и естествоиспытатель, основоположник математического учения о бесконечном. Со своей стороны, инженеры начинают пользоваться математикой.

Со второй половины XV столетия начинается так называемый Ренессанс. «Это был величайший прогрессивный переворот из всех, пережитых до того времени человечеством», пишет Энгельс, — эпоха, которая нуждалась в титанах и которая породила титанов по силе мысли, страсти и характеру, по многосторонности и учености... Тогда не было почти ни одного крупного человека, который не со-

вершил бы далеких путешествий, не говорил бы на четырех или пяти языках, не блистал бы в нескольких областях творчества. Леонардо да Винчи был не только великим живописцем, но и великим математиком, механиком и инженером, которому обязаны важными открытиями самые разнообразные отрасли физики. Альбрехт Дюрер был живописцем, гравером, скульптором, архитектором и, кроме того, изобрел систему фортификации... Герои того времени не стали еще рабами разделения труда, ограничивающего, создающего однобокость, влияние которого мы так часто наблюдаем у их преемников. Но что особенно характерно для них, так это то, что они почти все живут в самой гуще интересов своего времени, принимают живое участие в практической борьбе, становятся на сторону той или иной партии и борются кто словом и пером, кто мечом, а кто и тем и другим вместе. Отсюда та полнота и сила характера, которые делают их цельными людьми. Кабинетные ученые являлись тогда исключением; это или люди второго и третьего сорта, или благоразумные филистеры, не желающие обжечь себе пальцы»¹⁵.

Одним из первых высказался о значении математики в инженерном деле Филиппо Брунеллески (1377—1446). Его математические познания и изучение римских построек дали ему возможность установить пропорции зданий, одновременно эстетические и технически выгодные. Таким образом, в строительство сознательно введены были расчетные методы, что составило первый шаг строительной механики. Им был создан купол флорентийского собора — один из шедевров мировой техники; при этом он сконструировал несколько подъемных машин.

Естественно, что математика применялась инженерами и до Брунеллески, но в неявной форме: она составляла сущность подобия различных конструкций; после него математику (т. е. арифметику и геометрию) начинают изучать и инженеры: она входит в круг познаний, необходимых каждому художнику и каждому технику.

Еще с XIII в., с легкой руки Виллара де Гоннекура описывали машины. Теперь начинаются попытки и пояснить их действие. Ко второй половине XV в. относится деятельность Леона Баттиста Альберти¹⁶. Ему принадле-

жит несколько книг. В 1450 г. он написал на итальянском языке «Зрелища» (Ludi) — книгу, посвященную некоторым вопросам практической математики и механики. Здесь он учит измерять высоту зданий, расстояния предметов друг от друга, приводит ряд сведений из гидравлики и космографии, описывает построенные им весы и прибор, названный им «уравновешивателем» (equilibra или archipendolo) и предназначенный для определения отношений между двумя различными весами, для измерения уровня на местности, для правильной установки мортир и определения угла прицела. Далее он описывает свой «шагомер» и приводит некоторые задачи из гидростатики.

Основная работа Альберти, «Десять книг о зодчестве», была опубликована после его смерти, в 1485 г. Здесь он касается и машин, правда, лишь в той степени, в коей это нужно для производства строительных работ. Впервые у него появляются элементы анализа — расчленение механизмов на их составные части. Глава VII шестой книги озаглавлена «О колесах, втулках, рычагах, полиспадах и их величине, форме и фигуре». Вот что он говорит о колесах: «Колеса в значительной степени сходны с роликами. Ибо они всегда давят на одну точку по отвесу. Но разница в том, что ролики подвижнее, а колеса из-за трения вращаются медленнее. Частей в колесе три: наружная, наибольшая кайма круга, средняя ось и, наконец, тот круг, в который ось вставляется, как в запястье; ее некоторые называли бы полюсом, мы же, так как в одних машинах она неподвижна, в других движется, назовем ее, если позволено будет, втулка. Если колесо вращается на толстой оси, то будет катиться труднее, если на тонкой — ось не выдержит тяжести. Если наружный охват колеса небольшой, что, как мы сказали, бывает у роликов, то оно застревает в земле, если широкий — шатается из стороны в сторону, а если нужно повернуть вправо или влево, повинуется с трудом. Если втулка слишком свободна, то, когда колесо катится, оно соскакивает, а если она слишком плотна, делается неподатлива. Промежуток между осью и втулкой должен быть скользким, ибо из них одна заменяет путь, а другая — основание груза. Ролики и колеса делают из вяза и

Работал во Флоренции и в Риме, был художником, архитектором, инженером, писателем. Кроме трудов в области техники и архитектуры написал несколько комедий на итальянском и латинском языках. Практик и теоретик.

¹⁵ Ф. Энгельс. Диалектика природы, с. 7—8.

¹⁶ Леон Баттиста Альберти (Leon Battista Alberti, 1407—1472) — один из универсальных специалистов итальянского Ренессанса

каменного дуба, оси — из остролиста и кизила или еще лучше из железа, втулки — лучше всего из меди, сплавленной с одной третьей частью олова. Диски суть совсем маленькие колеса»¹⁷.

Альберти сам указывает на свой метод изложения, замечая, что он решил говорить в своей книге не как математик, а как ремесленник и лишь о самом главном. В следующей, восьмой, главе, он описывает применение винта и кранов к подъему тяжестей. Совершенно в духе Возрождения он замечает, что «машины, как живые существа, имеют очень сильные руки и передвигают грузы почти так же, как мы сами двигали бы грузы. Поэтому необходимо и в машинах подражать тем движениям членов и сухожилий, которыми мы пользуемся, бросая, толкая, таща, перенося». Это любопытное замечание отображало начало поисков сродства между машинами и животными, развитых несколько позже.

Работы Альберти в области механики почти совсем неизвестны; между тем он оставил рукопись, иллюстрированную им самим, с описанием мельниц, подъемных машин, насосов; на полях рукописи имеются заметки, сделанные Леонардо да Винчи.

Приложением математики к технике и искусству занимался также крупнейший художник немецкого Возрождения Альбрехт Дюрер (1471—1528). В своем «Наставлении к укреплению городов» (1525) он разработал теорию фортификации. В ряде работ он заложил основы проекционного черчения, явившись тем самым предшественником Г. Монжа.

В 1453 г. пала Византия и ее столица, Константинополь, попала в руки турок. Византийские ученые, бежавшие на Запад, захватили с собой много бесценных рукописей греческих и эллинских ученых, знакомство с которыми дало многое европейским ученым: мир науки и культуры внезапно расширился и на многие факты пролился новый свет. В 1492 г. Колумб открыл новые земли — Индию, как думал он сам, а в действительности — неизвестный дотоле континент, как оказалось потом, Америку. Утверждают, что этот континент был известен еще в X в. норвежским мореплавателям; возможно, что еще раньше там бывали

африканцы. Но лишь после путешествия Колумба расширился мир и было получено практическое доказательство широтности Земли и оказалось, что обитатели потусторонних земель ходят не в вниз головой, как думали многие, а вниз ногами, подобно европейцам. Расширение мира вызвало оживление торговой и цеховой деятельности; последовавшая консолидация монархий, закончившаяся с феодальной раздробленностью в ряде европейских стран, стимулировала дальнейшее развитие науки и техники. И людям Ренессанса, как это удачно заметил Энгельс, приходилось быть специалистами на все руки в полном смысле этого слова. Таким универсалом был и Леонардо да Винчи¹⁸.

Великий художник, ученый и инженер, Леонардо да Винчи был одним из самых выдающихся изобретателей машин в истории человечества, хотя многие из его предположений были осуществлены с опозданием в двести, а то и триста лет. Вечный экспериментатор, он работал для себя и не смог привести в систему свои глубокие знания и открытия. В результате этого его рукописи долгое время



Леонардо да Винчи

¹⁸ Леонардо да Винчи (Leonardo da Vinci, 1452—1519) родился в Анкиано, около Винчи, учился во Флоренции у художника Верроккьо, много занимался самообразованием. В 1483—1499 гг. служил у миланского герцога в качестве военного инженера. Создал в Милане большую фреску — «Тайную вечерю», которая почти сгладилась, так как он применил при ее исполнении экспериментальные краски. Работал над проектами летательных аппаратов, изучал движения человека и животных. В 1500—1506 гг. работал во Флоренции, затем возвратился в Милан, где пробыл до 1513 г. Несколько лет жил в Риме, где написал «Джоконду». В 1516 г. переселился во Францию, где и скончался в Амбазе 2 мая 1519 г. Схемы механизмов и высказывания по вопросам техники содержатся в его записных книжках и в отдельных заметках, которые потом были собраны в «Кодексы».

¹⁷ Л. Б. Альберти. Десять книг о зодчестве. Пер. В. П. Зубова. М. Изд-во Всесоюзной академии архитектуры, 1935, т. I, с. 189—190.

лежали под спудом, были разрознены, разошлись по разным хранилищам и лишь в конце XIX в. началась их публикация. Однако считать, что его труды полностью остались в стороне от главного пути технического прогресса, также неправильно. У многих технических писателей начиная с XVI в. очевидно непосредственное или посредственное знакомство с рукописями Леонардо. Кроме того, у него осталось много учеников, знакомых с его идеями и сотрудничавших в его начинаниях.

А знал он многое. Он интуитивно пришел к понятию механизма, хотя его и не сформулировал, и не только выделил механизмы из известных ему машин, но и создал много новых. Интуитивно же он пришел к понятию машинной детали. Это понятие в зародыше было уже у древних; следы его есть и у Альберти. Однако Леонардо иначе воспринимает машины, его мышление синтетично, для него элементы машин — механизмы и составляющие их детали — являются основой, и от них он переходит к понятию машины.

Зубчатые зацепления известны Леонардо в самых различных разновидностях, начиная от цилиндрической зубчатой передачи и кончая винтовыми колесами и глобоидальным червяком¹⁹. По поводу передачи с непересекающимися осями он пишет: «Когда передача расположена вне диаметра колеса, то она совершает и вращательное и скользящее движение. Такая передача, расположенная вне своего диаметра, сильно изнашивает свою шестерню, а также и зубцы колеса. В начале соприкосновения колеса с шестерней оно прикасается к цевкам в их верхней части, а когда оно их покидает, то оно покидает их в нижней части, так что со встречи до расхождения оно совершает два движения, именно вращательное и скользящее»²⁰.

Диапазон механизмов, известных Леонардо, велик: у него встречаются кулачковые механизмы, винтовые передачи, передачи с гибким звеном, он знает механизмы — счетчики расстояния. Он изобрел несколько гидравлических машин, в том числе тангенциальную турбину, прядильный станок, волочильный станок, станок для насечки пилыльников, приспособлений для нарезки винтов, в част-

ности приводной станок со сменными колесами. Ему принадлежит ряд проектов грузоподъемных машин, в том числе проект передвижного экскаватора на трех рельсах, предназначенного для разработки грунта одновременно в трех горизонтах. Идея одноковшового экскаватора также, по видимому, принадлежит Леонардо.

Размышления Леонардо в области теории живописи и механики привели его к выводу о важности математики для самых разнообразных сторон практической деятельности. По введении к трактату о живописи он пишет: «...пусть тот, кто не математик, меня не читает»; рассуждая о перспективе, он добавляет: «При изучении вещей и истинных причин свет все более восхищает зрителей; между великими вещами математики достоверность доказательств самым светлым образом возвышает мысль исследователей. Следовательно, перспектива должна предшествовать всем трактатам и человеческим наукам, поскольку в ее изучении светлая линия проникает в математические доказательства... Я вкратце изложу аксиомы перспективы, соединяя естественные законы с математическими доказательствами». Ибо «Никакое человеческое знание нельзя считать наукой, если оно не располагает математическими доказательствами»²¹.

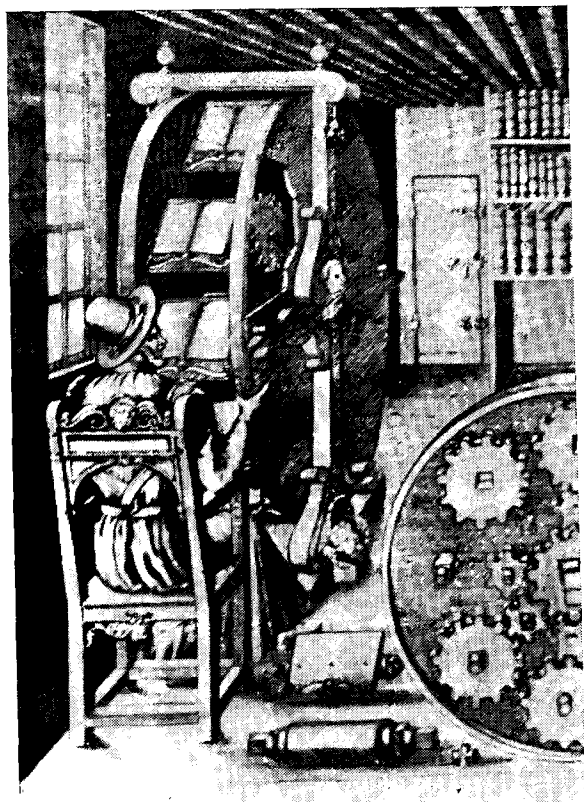
В XVI в. машинам было посвящено довольно много книг, однако и большинство случаев их авторы лишь описывают машины. Появляются и новые механизмы, но они обычно привязаны к конкретным машинам. Так, Ваноччо Бирингуччо (1480—1539) и Георг Бауэр, известный под латинизированным именем Агрикола (1494—1555), описали машины и механизмы, применявшиеся в горнозаводской технике.

Бирингуччо довольно подробно рассмотрел вентиляционную технику и «различные виды машин, служащих для использования мехов при плавке металлов». Эти машины приводились в движение человеком при помощи pedalного привода или водяным колесом, на главный вал которого насаживались кулачки. Бирингуччо построил одну из первых установок для одновременного привода нескольких машин от одного источника энергии (от водяного колеса); привод этот представлял из себя шарнирный меха-

¹⁹ См., напр.: Th. Beck. Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaues. Berlin, 1930, S. 320—322, Ill. 383—397.

²⁰ Цит. по кн.: А. И. Сидоров. Очерки по истории техники, т. II. М., 1928, с. 15.

²¹ К. Chiancone. Leonardo da Vinci. Montevideo, 1957, p. 50.



Машина для чтения книг

ним, подущее звено которого — кривошип — было жестко связано с главным валом установки.

Агрикола изучал горные машины. Он разделил их на грузоподъемные, вентиляционные и «лестницы». Первые приводились в движение вручную одним или двумя рабочими, иногда при помощи топчак или конного привода. Типы приводов те же, что и раньше, но обработка их, в особенности зубчатых колес, становится более тщательной. Он описывает и металлургические машины: мельницы для обработки руды, толчеи, приводимые в движение кулач-

ковыми механизмами. Есть у него и приводы, распределяющие энергию на несколько механизмов.

Подобные механизмы строили и на Руси. В середине XVI в. в Соловецком монастыре, одном из самых отдаленных северных поселений Московского государства, игумен Филипп Колычев²² построил машины и приспособления, поразившие современников. Филипп построил несколько мельниц («мельницы делал да ручьи копал к мельницам, воду приводил к монастырю», — пишет соловецкий летописец). На мельнице были установлены рассев («доспел севальни», десетью решеты один старец сеет») и крупорушка («доспели решето, само сеет и насыпает и отруби и муку равнодит ровно, да и крупу само же сеет и насыпает и разводит ровно ирупу и высойки»).

Было механизировано и производство кваса. Если раньше этим делом занималась «вся братия и слуги многие из швальни», то при помощи приспособлений с этой работой справились один монах и пять служителей. Квас выпаривали, и он «сам сольется из всех щанов да вверх подоймут, вино трубою пойдет к монастырю да и в погреб сам льется да по почкам равнойдотся сам во всем».

В монастыре были устроены соляной промысел, железнотопильное и кирпичное производства. Колычев поставил здесь несколько солеварен, соорудил сложную водную систему, необходимую для питания мельниц: «Горы бо великия прокопа и юдолия избради, и воду теши от озера по оврагу претвори и двадцетим бо пятьдесят озером число и дни источника сотвори и под монастырь во озеро привел. От оврага же воду испусти, внутрь киновии привел. Толчею же и мелению ко успокоению братскому сотвори»²³. Колычев был не единственным «розмыслом» на Руси, и к XVI в. технологические мельницы были уже достаточно распространены от Львова и Киева до северных пределов страны.

С середины XVI в. темпы развития машинной техники ускорились. Вызвано было это общим ростом экономики

²² Филипп (Федор Степанович) Колычев (1507—1569) — выдающийся инженер Московской Руси. В 1566 г. был избран митрополитом Московским. 23 декабря 1569 г. его по приказу Ивана Грозного являющийся царский любимец — опричник, думный дворянин Г. И. Понский (Малюта Скуратов), тесть царя Бориса Годунова.

²³ Летопись [Немчинов]. Летописец Соловецкий. М., 1847, с. 31—34.



Д. Кардано

Западной Европы и зарождением мануфактурного производства. «Мануфактурный период упрощает, улучшает и умножает рабочие инструменты путем приспособления их к исключительным особенностям функциям частичных рабочих. Тем самым он создает одну из материальных предпосылок машины, которая представляет собою комбинацию многих простых инструментов»²⁴. Все большее распространение машин заставляет обратить внимание не только на их описание, но и на состав; начинают обращать внимание на узлы машин.

Одним из первых теоретиков учения о машинах стал Джеронимо Кардано²⁵. В своих трудах Кардано пытается вывести общие правила передачи движения применительно к зубчатым механизмам. Он приводит определение передаточного числа и пользуется им при подсчете чисел зубьев в зубчатой передаче. Одним из первых он заметил необходимость разложения машины на ее составные элементы и в его словах: «то, что движет движимое, должно непременно его касаться» можно видеть первое высказывание тех идей, которые впоследствии развились в теорию кинетических пар.

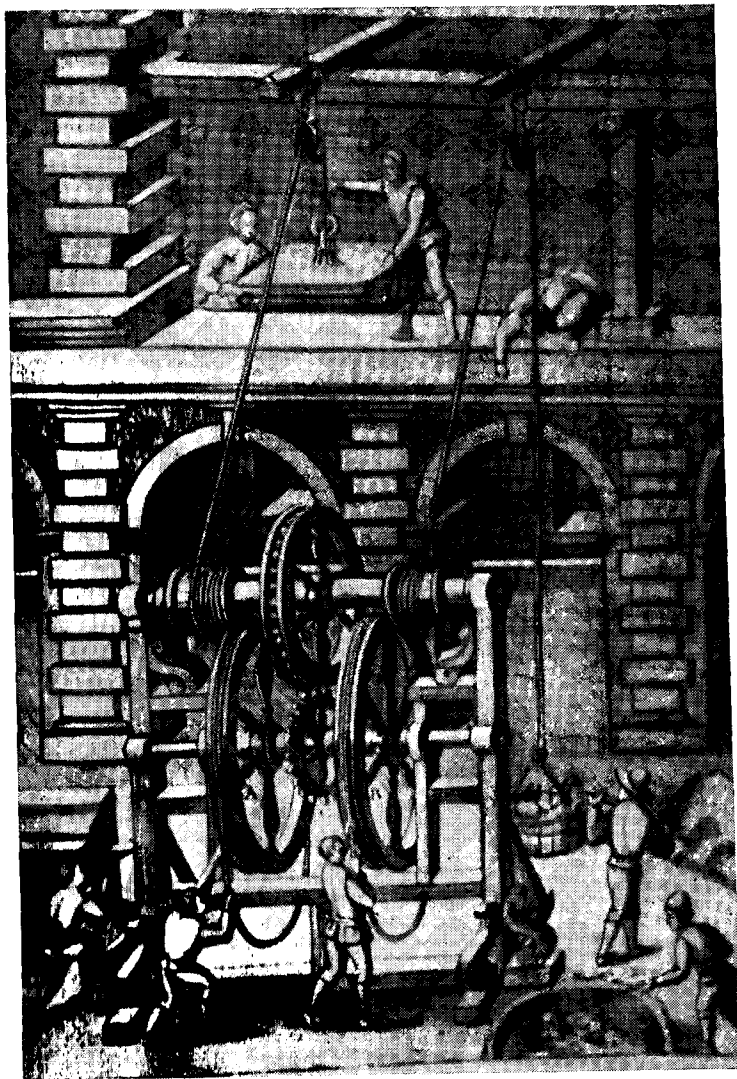
Кардано описал зубчатые передачи, передачу гибкой нитью, сформулировал правила построения часовых механизмов, дал описание часовых пружин и баланса. Он указывает, что добиться равномерности хода часов на протя-

жении суток невозможно: зубья колес неодинаковы, и натяжение пружины в начале сильнее, чем в конце. Грязь и пыль со временем ослабляют пружину, «поэтому все часовые механизмы со временем идут медленнее и ни один не движется быстрее... Часовые механизмы нашего века приводят больше времени у часовщика, чем у владельцев».

Таким образом, Ренессанс стимулировал изменение направления наук: они стали ближе к практике, и это касалось не только естественных, реальных наук, но и наук гуманитарных. Официальная наука, которую преподавали в университетах, основанная на рассуждении, вступила в противоречие с наукой практиков, основанной на наблюдении и опыте: это обстоятельство повлекло за собой и новые организационные формы: начиная с XV в. возникают кружки ученых, получающие название академий. Так, в 1438 г. Козимо Медичи основал во Флоренции Платоновскую академию, в 1542 г. в Риме была основана Пиструминская академия. В Милане академия была организована Леонардо да Винчи. В 1603 г. была основана в Риме «Академия дей Линчей» (dei Lincei — «рысьеглазых»). Но все эти академии оказались жизнеспособными, однако были и такие, которые сумели сплотить постоянные группы участников, получить финансовую поддержку и стать официальными научными учреждениями. Некоторые академии принимают на себя и учебные функции. Так, в XVI в. Флорентийская академия ввела преподавание математики, но не «чистой» (арифметика, алгебра, геометрия), как в университетах, а «прикладной», которую можно было применять для решения различных инженерных задач. В Милане у Леонардо да Винчи учились маркиз Мариньяно; ученик последнего Агостино Рамелли (1530 — 1600), математик и военный инженер французского короля Рихарда III, в конце XVI в. опубликовал труд «Le diverse et artificiose machine» — одно из самых интересных и самых распространенных в XVII в. сочинений по машинам. В этой книге можно найти развитие ряда идей великого итальянского художника. Машины Рамелли, как правило, очень сложны, даже более сложные, чем это было бы необходимо, но в них представлены самые разнообразные типы передач. Автор не рассказывает о передаче и преобразовании движения, а показывает это на иллюстрациях, и, очевидно, поэтому его книга так ценилась инженерами в течение двух столетий. Диапазон его механизмов велик.

²⁴ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 23, с. 353.

²⁵ Джеронимо (Джироламо) Кардано (1501—1576) окончил Павийский университет, где изучал математику, философию и медицину. Был врачом, профессором математики, пробовал заниматься и астрологией, однако из-за неудачных предсказаний попал в тюрьму, где пробыл почти 8 лет. Преподавал в Милане, Павии, Болонье. Вместе с Никколо Тартальей (1499—1557) нашел правила решения уравнений третьей степени.



Подъемная машина (по Рамелли)

Он описывает не только преобразование вращательных движений, но и вращательного во вращательно-поступательное: для этой цели используется зубчатая рейка и кривошипно-шатунный механизм с бесконечной цепью.

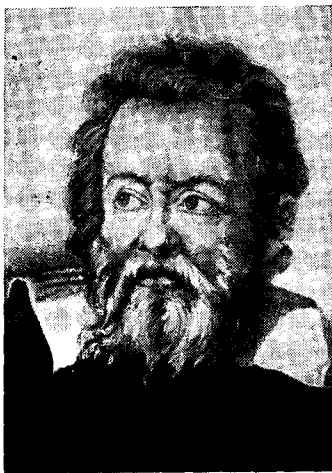
В механизмах, описанных Рамелли, встречаются червяки и зацепления с колесом и зубчатым сектором, винтовые передачи, кулачковые механизмы с разной степенью гладкости, храповые механизмы, механизмы с гибким приводом, шарнирные механизмы, в том числе кулисные и кривошипно-шатунные.

Развитие машин в XVI—XVII вв. представляет значительный интерес не только само по себе. «Очень важную роль», — как указывает Маркс, — сыграло sporadическое применение машин в XVII столетии, так как оно дало великим математикам того времени практические опорные пункты и стимулы для создания современной механики²⁶. Революция в механике начинается от Галилея²⁷. На рубеже XVI и XVII столетий он опубликовал «Трактат о механике», где впервые делает общие выводы относительно машин. Так, он указывает на четыре «предмета», которые следует принять во внимание при изучении машин: «первый — это груз, который нужно перенести с места на место; второй — это сила или мощь, переносящая груз; третий — это расстояние между начальной и конечной точками перемещения; четвертый — это время, в течение которого должно произойти перемещение; но время сводится к тому же, что и скорость, быстрота (velocitas) движения, ибо из двух движений за более быстрое принимается то движение, при котором то же расстояние проходит за меньшее время»²⁸. Однако общая теория ма-

²⁶ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 23, с. 361.

²⁷ Галилео Галилей (Galileo Galilei, 1564—1642) — великий итальянский физик, механик и астроном, родился в Пизе, там же изучал медицину. С 1589 г. преподавал в Пизанском университете, а в 1602 г. получил кафедру математики в Падуе. Здесь он стал убежденным последователем Коперника; здесь же разработал основы динамики и учения о прочности. В 1610 г. переехал во Флоренцию, где занял должность «первого математика» в университете, без обязанности читать лекции. В 1611 г. был в Риме, принял участие в организации Академии дей Линчей. В 1616 г. учение Коперника было объявлено ересью, а в 1633 г. был начат процесс против Галилея. До своей кончины он жил под надзором инквизиции без права печатания трудов.

²⁸ Г. Галилей. Избранные труды, т. 2. М., «Наука», 1964, с. 8.



Г. Галилей

шин у Галилея статична, она основана на принципе равновесия сил, и он не видит существенного различия между машинами и простыми машинами. На это есть основание: скорости машин незначительны, и основанием для расчета служит равенство двух моментов, приложенных к ведущему и ведомому звеньям.

Одновременно Галилей развивает динамику. Являясь убежденным сторонником и продолжателем Коперника и Кеплера, он изучает законы свободного падения тел, движения тела по наклонной плоскости, движения тела, брошенного под углом к горизонту.

Механика Галилея и его учеников имеет принципиальные новшества в самой методике исследования: во главу угла ставится опыт и опыт является важнейшей характеристической особенностью научной революции XVII в., начатой Галилеем.

Идеологом метода стал Фрэнсис Бекон (1563—1626) — английский политический деятель, естествоиспытатель и философ. Экспериментом как методом исследования пользовались и до него; на опыт, как на самого верного руководителя и паучюм исследовании, указывал еще Роджер Бэкон, однако доктрины эксперимента создано не было и он продолжал играть менее чем второстепенную роль. В работе «Новый Органон» Бекон обосновал свой метод индукции и пояснил важность проверки законов. Тем самым точное естествознание получило свое обоснование: с этого времени темпы развития научного знания начали убастряться.

На протяжении XVII в. происходит разработка основ механики. Галилей закладывает основы учения о сопротивлении материалов, его ученик Э. Торричелли и Б. Паскаль работают над основами гидростатики; они же и О. фон Герике изучают атмосферное давление; к концу века был

создан воздушный насос и велись опыты над созданием паровой машины. Х. Гюйгенс и Р. Гук, проводя экспериментальные и теоретические исследования над конструкцией часов, изучают колебания маятника и действие пружин; Гюйгенс закладывает основы теории колебаний, а Гук продвигает свой знаменитый закон, вводящий математические методы в расчет прочности тел.

Декарт в свое время пытался создать механическую картину мира, но не смог найти ее математического описания. Эту титаническую работу выполнил Исаак Ньютон.

Создание механики идет параллельно с созданием новой математики, и те же ученые, которые работают над проблемами механики, физики и астрономии, создают для себя соответствующий математический аппарат. Декарт завершает разработку координатного метода и включает классическую геометрию в алгебру (1637), Ферма (1649) выводит упрощения для прямой линии и конических сечений относительно «декартовой» системы осей. Графическое изображение кривых, обусловленное некоторыми задачами механики, дает возможность поставить задачу об определении касательной к кривой в заданной точке; к аналогичным задачам приводит и определение скоростей тел, брошенных под углом к горизонту. Формулируются задачи определения площадей фигур, ограниченных произвольными кривыми линиями, и тел, имеющих искривленные поверхности, например в «Стереометрии бочек» („Stereometria doliorum“, 1615) И. Кеплера. Все это определило появление новой математики, имеющей дело не с конечными величинами, как это было с классической геометрией, а с бесконечно малыми величинами. Б. Кавальери в своей «Геометрии» (1635) развил теорию неделимых; он исследовал поведение конечных, хотя и весьма малых величин. М. Гиччи получил касательные и экстремальные значения почти геометрическим методом (1666). Геометрическими же методами пользовались И. Барроу и Гюйгенс. Однако почти одновременно с работой Кавальери намечилось и другое направление, основанное на изучении кривых и приведение к методу бесконечно малых. Метод определения экстремальных значений с помощью незначительного изменения переменного в алгебраическом уравнении с последующим обращением этого изменения в нуль открыл Фэрма (1638); метод этот обобщил И. Гудде (1658). На основе методов операций «дифференцирования» и «инте-

пированья» обратил внимание И. Барроу (1670). И, наконец, в трудах Ньютона и Лейбница общий метод дифференцирования и интегрирования получил завершение. Ньютон открыл этот метод в 1665—1666 гг., но Лейбниц первым опубликовал свои результаты (1684—1686), что и послужило причиной большого спора о приоритете. Впрочем, школа математического анализа ведет происхождение от Лейбница.

Такая интенсивная работа ученых стала возможной лишь благодаря тому, что улучшились связи между отдельными учеными и взаимная информация о достижениях и полученных результатах. Важную роль в этом направлении сыграл кружок ученых, объединившихся вокруг монаха Марсена Мерсенна (1588—1648). Этот кружок продолжал функционировать и после смерти Мерсенна, а в 1666 г. на его основе организована Французская академия наук. Несколькими годами ранее, в 1660 г., было основано в Лондоне Королевское общество, базой для которого послужил кружок оксфордских и лондонских ученых. Душой Королевского общества, руководителем экспериментов, а впоследствии его секретарем был доктор Роберт Гук (1635—1703). Эти две академии сыграли важную роль в организации науки. В частности, им принадлежит честь основания научной периодики: 5 января 1665 г. в Париже вышел первый номер «Журнала ученых» (*Journal des Sçavans*), а 6 марта 1665 г. был издан на 16 страницах ин-квартио первый номер лондонских «Философских сообщений» (*Philosophical Transactions*).

Изучение машин составило большую и важную часть исследовательской работы обеих академий; первый устав Королевского общества (1663) гласил: «Занятием и назначением Королевского общества является: Совершенствовать знания естественных вещей и всех полезных искусств, мануфактур, практической механики, машин и изобретений с помощью экспериментов...»²⁹. И едва ли не все математики и механики XVII в. в какой-то степени сделали вклад в науку о машинах. В эти годы были положены основания некоторым идеям кинематической геометрии, учения о зацеплении, теории колебаний; ученые начали работать над созданием вычислительной машины и была высказана мысль о подобии животных (и человека) ма-

шин. Следует не забывать, что основным назначением машин XVII в. все еще была замена физической силы человека; «умных» машин еще не было, поэтому сама эта мысль и определенной степени являлась прогнозом дальнейшего развития машин.

Одним из первых высказал эту мысль Декарт (1596—1650). Его механика исключала понятие силы и сводила это многообразие явлений природы к очень небольшому числу простейших принципов. Декарт считал живые существа подобными машинам. Он считал, что это «ничуть не покажется странным тем, кто знает, сколько различных автоматов, или самодвижущихся машин, может произвести человеческое искусство, пользуясь при этом немногими частями, в сравнении со множеством костей, мускулов, нервов, артерий, вен и всех других частей, находящихся в теле каждого животного»³⁰. В своей основополагающей работе по противопоставлению материалов «Рассуждения и математические доказательства о двух новых науках», изданной в Лейдене в 1638 г., Галилей для пояснения законов механики пользуется примерами из растительного и животного мира. Итальянский физиолог и врач Вильям Гарвей (1578—1657), открывший большой круг кровообращения, в 1628 г. пробовал количественно оценить поток крови в теле в духе механики того времени.

Научное направление, работавшее на стыке идей физиологии и механики, получило название ястромеханики. Виднейшим его представителем был последователь Галилея Джованни Альфонсо Борелли (1608—1679). Медик и математик по образованию, он преподавал свыше 20 лет математику в университете Мессины, занимался астрономией, принимал участие в трудах Академии дель Чименто. Его основное сочинение — «О движении животных» (*De motu animalium*) — было издано в Риме в 1680—1681 гг. в двух томах. Первый том содержал описание структуры, формы, действия и мощности мускулов человека и животных и учение о их движениях. Второй том был посвящен мускульным сокращениям, движениям сердца, кровообращению, иннервации с указанием соответствующих механических аналогов и с подходящими математическими подсчетами. XIII глава этого тома, посвященная полету птиц, является

²⁹ H. Lyons. The Royal Society 1660—1940. Cambridge, 1944. p. 42.

³⁰ H. Descartes, Oeuvres, publiées par Ch. Adam et P. Tannery, t. VI, p. 55, 56.

одним из первых исследований в направлении теории полета. Здесь, в частности, он пишет: «Если поставить вопрос, может ли человек летать с помощью собственной силы, то сперва следует установить, имеет ли требуемую величину сила мускулов его груди (мощность которых может быть оценена по их толщине); она должна быть настолько велика, чтобы превзойти вес самого человека вместе с чрезвычайно большими крыльями, прикрепленными к рукам... Совершенно ясно, что сила мускулов груди человека чересчур мала для возможности полета, ибо у птиц масса и вес мускулов, служащих для ударов крыльями, составляют не менее одной шестой полного веса тела. Следовательно, и у человека мускулы груди должны были бы составить более одной шестой веса его тела, чтобы они при помощи ударов крыльев, прикрепленных к рукам, могли создать силу... что, однако, не возможно, так как они не достигают и сотой части веса тела...» Отсюда следует, продолжает Борелли, что легенда об Икаре является всего лишь мифом. Поэтому для подъема человека нужно было бы применить иные средства, например поступать подобно рыбе, которая поднимается при помощи пузыря. К человеку также можно было бы прикрепить сосуд с очень тонкими стенками и выкачать с помощью ртутного насоса воздух из этого сосуда. Однако это тоже невозможно, так как сосуд должен был бы иметь объем не менее 22 000 кубофуттов и не найдется достаточного количества ртути для удаления из него воздуха³¹.

Идеи Борелли не остались в стороне от развития науки: ими продолжали интересоваться и позже, и нам придется встретиться с ними еще не один раз.

Кинематические исследования, возникшие на стыке геометрии и механики, основывались главным образом на исследовании поведения кривых в процессе их воспроизведения. Так, Декарт в книге II «Геометрии», озаглавленной «О природе кривых линий», делит все кривые линии на два класса. К первому классу, названному им геометрическим, он относит те линии, которые «описаны непрерывным движением или же несколькими такими же последовательными движениями, из которых последующие вполне определяются им предшествующими». Ко второму классу механических кривых относятся такие линии, отдельные

движения, необходимые для описания которых, между собой независимы. Декарт указывает: «возможно, что допустить линии, более сложные, чем конические сечения, древним геометрам помешало то обстоятельство, что из этих кривых или в первую очередь случайно познакомились со спиралью, квадратриссой и им подобными. Эти кривые действительно принадлежат только механике и не относятся к тем, которые должны, на мой взгляд, быть идеей допущены, так как их предшественники себе описанными двумя отдельными движениями, между которыми не существует никакого отношения, которое можно было бы точно измерить»³².

Таким образом, оба класса кривых, рассматриваемых Декартом, оказываются воспроизводимыми с помощью механических приспособлений. Средства для этого воспроизведения он называет инструментами или машинами. Относительно к числу последних также циркуль и линейку. Однако, и это самое существенное, Декарт считает, что кривые первого класса, выражающиеся с помощью алгебраических уравнений, можно воспроизвести инструментами, состоящими из взаимосвязанных звеньев, которые мы отнесли бы к группе шарнирных механизмов. Следовательно, установившаяся связь между алгебраическими кривыми и соответствующими шарнирными механизмами, Декарт предвосхитил теорему Кемпе и (даже с учетом сделанных при этом ошибок) заложил основы теории шарнирных механизмов.

Одновременно с Декартом движениями по кривым занимались ученые, связанные с кружком Мерсенна. Как указывает Паскаль³³, первым нашел рулетку (циклоиду) сам



Р. Декарт

³¹ G. A. Borelli. De motu animalium, Roma, 1680.— «Oswalds Klassiker», N 221. Leipzig, 1927, S. 33—34.

³² Р. Декарт. Геометрия. Пер. А. П. Юшкевича. М.—Л., ГОНТИ, 1936, с. 30—31.

³³ B. Pascal. Œuvres complètes. Paris, 1963, p. 117.

Мерсенн³⁴ около 1615 г., рассматривая качение колес (des roues); поэтому он и назвал эту кривую рулеттой (roulette). Паскаль говорит далее, что у него был особый талант ставить вопросы, но сущность и свойства рулетты остались для него неясными. В 1634 г. он предложил эту задачу Робервалю³⁵, который и решил ее. Несколько позже, в 1635 г., в ответ на предложение Мерсенна же задачу о рулетте решили Ферма и Декарт. В 1638 г. Богран (Beaugrand) собрал все эти решения и послал их Галилею, который уже не успел заняться этим вопросом, но его ближайший ученик Эванджелиста Торричелли (1608—1673) добавил к трем решениям задачи еще свое. К этому времени кривая получила еще два наименования: Роберваль назвал ее троихойдой, а Богран — циклоидой.

Около 1648 г. вопросом о циклоиде заинтересовался Паскаль³⁶, затем Христиан Гюйгенс и математик и архитектор Христофор Рен (1632—1723).

Циклоида изучалась и с точки зрения ее механических свойств и возможности ее практического использования; кроме того, изучение ее экстремальных точек и построение к ней касательных, а также отыскание соответствующих площадей послужило к становлению анализа бесконечно малых. Вместе с тем началось изучение других кривых, порождающихся при движении точки по определенному закону. Не ограничиваясь циклоидой, Роберваль разработал общий метод построения касательных к кривым (1636), основанный на кинематическом составлении движений в плоскости. Роберваль первым попытался определить понятие силы, разработал доказательство параллелограмма сил.

³⁴ Марен Мерсенн (Marin Mersenne, 1588—1648) — математик и философ, учился вместе с Декартом; их дружба продолжалась всю жизнь. Много путешествовал, вступил в контакт с виднейшими математиками и физиками эпохи: с ним вели переписку Галилей, Кавальери, Паскаль, Роберваль, Торричелли, Ферма и многие другие. В Париже у него происходили еженедельные заседания ученых.

³⁵ Жиль Персон де Роберваль (Giles Personne de Roberval, 1602—1675) родился в Бове. С 1627 г. жил в Париже, где познакомился с рядом ученых, входивших в кружок Мерсенна; профессор математики. Один из первых членов Парижской академии наук.

³⁶ Блез Паскаль (Blaise Pascal, 1623—1662) — выдающийся физик, математик и механик, один из основателей анализа, работал в области гидро- и аэростатики. Изобрел счетную машину. Его «История рулетты» — классическое произведение по истории науки.

В 1693 г. Парижская академия наук издала его «Трактат о составных движениях».

К этим исследованиям вплотную примыкают работы по использованию циклоидальных кривых в практической механике. Близкий друг Декарта, геометр и военный инженер Жерар Дезарг (1591—1661) изобрел эпициклоиду и указал на возможность ее применения при профилировании зубчатых колес. Нужно не забывать, что в XVII в. большинство зубчатых колес, включая колеса часовых механизмов, строились из дерева и едва ли нуждались в какой-либо профилировке, поэтому мысли Дезарга имели чисто теоретический интерес.

Однако исследования зубчатых колес были продолжены. В 1666 г. замечательный английский ученый Роберт Гук³⁷ разработал принципы зубчатого зацепления. Он указал, что зубчатые колеса должны иметь как можно больше зубцов, но чтобы зубцы при этом не ослаблялись, чтобы вращение колес было равномерным, а передаваемые ими усилия постоянными, чтобы точка контакта зубьев лежала на линии, соединяющей центры колес.

Гук построил очень много приборов, много работал с часами, внес в них ряд изобретений и поэтому относился к устройству зацеплений со значительно большей тщательностью, чем инженеры, строившие мельницы и машины. Он создал, в частности, зубчатое зацепление с косыми зубьями, которое для удобства изготовления предложил составлять из десяти тонких дисков, сдвинутых друг относительно друга на равную долю шага.

Идеи Дезарга получили свое дальнейшее развитие в работе датского астронома Олафа Ремера (1664—1710), который в 1675 г. подал в Парижскую академию наук предложение об использовании циклоидальных кривых для профилировки зубчатых колес. В 1694 г. ученик Дезарга Лагир³⁸ пояснил использование эпициклоиды для профи-

³⁷ Роберт Гук (Robert Hooke, 1635—1703) — механик, естествоиспытатель, физиолог, архитектор. Один из основателей Королевского общества, профессор геометрии в Грехем-колледже, изобретатель многих приборов. Оспаривал у Ньютона приоритет в формулировании закона всемирного тяготения.

³⁸ Филипп де Лагир (Philippe de Lahire, 1640—1718) — французский геометр и механик. Сперва был художником и руководил школой живописи, затем начал заниматься математикой. Изучал конические сечения. Профессор Коллеж де Франс, член Академии наук (1678).

лирования зубчатых колес и указал на тот факт, что выполненные таким образом колеса обеспечат постоянное отношение скоростей и что зубья будут в этом случае катиться (без скольжения, по мысли Лагира) друг по другу. Он выполнил чертеж зубчатого зацепления и построил пару циклоидальных колес.

Лагир оспаривал приоритет Ремера, заявляя, что свою работу он выполнил еще в 1674 г.

Часовое дело получило свое развитие в трудах Гюйгенса и Гука. Христиан Гюйгенс (1629—1695) — один из крупнейших ученых XVII в., сделал многое в области практической механики. Он изобрел маятник в качестве регулятора равномерности хода часов. Начиная с 1657 г., когда гаагский часовщик Костер изготовил по проекту Гюйгенса первые часы, он в течение многих лет работал над их усовершенствованием, создал ряд моделей точных хронометров, теорию маятника, исследовал с этой точки зрения циклоиду, создал учение об эволютах и эвольвентах, сформулировал теорему живых сил. В сущности теория колебаний как наука начинается от работ Гюйгенса в области теории маятника.

В половине 60-х годов часами занимался Гук: до 1665 г. он создал пружинные часы с балансом. В 1674 г. Гюйгенс повторил это изобретение, что привело к спору о приоритете между ним и Гуком.

Часовое дело стимулирует развитие механических автоматов. Последние сначала сопровождаются башенными и иными часами, затем начинают самостоятельное бытие. В XVII в. от построения автоматов выделяется изготовление счетных машин. В 1623 г. немецкий математик Вильгельм Шиккард (1592—1635), находившийся в дружественных связях с Кеплером, создал счетную машину, в которой использованы свойства передаточных отношений зубчатых зацеплений. Его «счетные часы», пригодные для четырех действий, не нашли практического применения. Впрочем, неизвестно и то, построил ли их и сам изобретатель.

Около 1642 г. Паскаль создал проект счетной машины, работать над которой он начал в ранней молодости. В 1645 г. работающий экземпляр машины был построен, и Паскаль получил на нее королевскую привилегию (патент). Ее кинематическая схема несколько напоминает схему машины Шиккарда и состоит из набора цевочных колес.

В 1673 г. Лейбниц доложил в Королевском обществе в Лондоне о новоизобретенной им счетной машине, которая, однако, в то время еще не полностью функционировала. Уже в следующем году Лейбниц смог внести в свою машину необходимые усовершенствования и весьма близко подошел к решению проблемы механизации вычислений. Изобретение Лейбница послужило базой для дальнейших работ в этом направлении.

Продолжаются и попытки создания приборов для черчения кривых. В 1646 г. Франц ван Схоотен (1615—1680) издал трактат «Об органическом описании конических сечений на плоскости», в котором приводит способы кинематического построения эллипсов, гиперболы и параболы, известные до того времени, и также найденные самим автором. Ньютон также искал кинематические способы построения кривых. Он нашел способы построения конических сечений, а также циклоиды.

Итак, к концу XVII в. техника обладала уже рядом достижений, из которых не все вошли в то время в техническую практику. Важную роль через 250 лет после изобретения сыграл шарнир Гука, придуманный им для крепления астрономических приборов: остроумное сочетание кинематических пар дало возможность с помощью этого приспособления передавать вращения между двумя валами, расположение которых в пространстве менялось. Следует отметить принципиальную разницу между подвеской Кирдана и шарниром Гука: современное машиностроениешло и практику именно изобретения Гука.

Революционные преобразования в науке, происходившие в XVII в., не коснулись современной механической техники: она продолжала очень медленно эволюционировать, но без важных изобретений. Были попытки создания



Х. Гюйгенс

нового универсального двигателя: итальянский архитектор Джованни Бранка (первая половина XVII в.) предложил использовать пар для приведения во вращение ведущего колеса технологической установки. В 1615 г. Саломон де Ко (ок. 1576—1630) предложил использовать пар для подъема воды. Около 1663 г. маркиз Ворчестер (1601—1667) несколько улучшил это решение; в 1698 г. насосная установка была усовершенствована Т. Севери (1650—1715), который применил для получения вакуума конденсацию пара.

Около 1670 г. Гюйгенс вместе с Дени Папеном (1647—1712) начал заниматься созданием пневматических и гидравлических машин. Сначала они ограничивались устройством насосов и фонтанов, но уже в 1673 г. Гюйгенс предложил создать машину, работающую силой взрыва. При этом он составил программу работ, в которой поднимал такие вопросы, как изучение движущих сил воздуха, пороха, гремучего золота и водяного пара. Пороховая машина Гюйгенса демонстрировалась в Парижской академии наук. В 1680 г. Лейбниц указал на схему «цилиндр—поршень» как наилучшую для пороховой или паровой машины. К концу столетия Папен создал работающий вариант машины.

Механические средства в XVII в. почти не меняются. В 1686 г. папа Сикст VI приказал установить на площади св. Петра в Риме обелиск, вывезенный из Египта императором Калигулой в 40 г. н. э. Обелиск этот высотой 23 м и весом в 327 т установил архитектор Доменик Фонтана при помощи лебедок. На этой работе было занято 800 человек и 140 лошадей. Почти через 100 лет, в конце века, была сооружена гидравлическая установка в Версале для подъема воды к фонтанам дворцового парка. Она считалась в то время чудом техники: строили ее с 1681 по 1685 г., стоила она уйму денег, а мощность ее не превышала 80 л. с., примерно была равна мощности 3,5-тонной автомашины. Установка состояла из 14 водяных колес, имевших в диаметре 12 м: колеса приводили в работу 221 насос, которые были расположены на трех уровнях и поднимали воду на 162 м.

Начали обращать внимание и на трение, причем одним из первых и здесь был Леонардо да Винчи. Гук указал на необходимость уменьшить трение между зубьями зацепляющихся колес. В 1699 г. Гийом Амонтон (1663—1705)

пришел к заключению, что трение зависит лишь от давления на площадь соприкосновения трущихся тел.

В конце XVII в. вопрос о машинах затронул Ньютон. Он писал: «В блоке или полиспасте усилие руки, тянущей снасть прямо, удержит прямо или наклонно поднимаемый груз в равновесии; если это усилие будет так относиться к весу груза, как скорость отвесного подъема груза относится к скорости руки, тянущей снасть. В часах и подобных им механизмах, состоящих из сцепленных между собой колес, две силы, взаимно противящиеся, т. е. такие, из коих одна способствует, другая же сопротивляется движению, находятся в равновесии, если эти силы обратно пропорциональны скоростям тех частей колес, к коим они приложены. Сила винта, сжимающего тело, так относится к усилию руки, вращающей рукоятку, как окружная скорость той точки рукоятки, где усилие руки приложено, относится к скорости поступания винта против сжимаемого тела. Силы, с коими клин раздвигает две части распиливаемого дерева, так относятся к силе молота, бьющего по клину, как скорость перемещения клина в направлении действующей от бьющего его молота силы относится к скоростям, с которыми части дерева уступают клину, причем эти скорости надо брать по направлениям, перпендикулярным к щекам клина. Совершенно подобно соотношению между силами и во всякого рода машинах. Действительность и назначение машин в том только и состоит, чтобы, уменьшая скорость, увеличивать силу, и наоборот, ибо во всех подобного рода приборах в сущности решается такая задача: заданный груз двигать заданною силою или же заданное сопротивление преодолеть заданным усилием.

В самом деле, если машина будет устроена таким образом, чтобы скорости точек приложения движущей силы и сопротивления были обратно пропорциональны этим силам, то движущая сила уравновесит сопротивление, при большем же отношении скоростей преодолеет его. Если отступление от пропорциональности скоростям будет таково, что будут преодолеваются сопротивления, происходящие от трения соприкасающихся и скользящих друг по другу тел, от сцепления тел непрерывных и разъединяемых и от подъема грузов, то, за исключением всех этих сопротивлений, избыточная сила произведет ускорение, пропорциональное его величине как в частях машины, так

и в сопротивляющемся теле»³⁹. Отрывок этот интересен тем, что представляет собой первое по времени изложение уравнения живых сил в применении к машинам, выраженное, конечно, в терминах эпохи.

Итак, за годы, отделяющие творчество Галилея от трудов Ньютона, существенно изменился взгляд на машину. Не только в недрах мануфактурного производства рождается машина-орудие: происходит количественное накопление сведений о машинах, наука следует за машиной и ее изобретателями. Примеры Папена, Гука и других показывают, что для того, чтобы изобретение нашло свое место в общественном производстве, недостаточно талантливости или гениальности его творца. Мануфактурный способ производства не мог обусловить развитие машин, ибо «мануфактура не была в состоянии ни охватить общественное производство во всем его объеме, ни преобразовать его до самого корня... Ее собственный узкий технический базис вступил на известной ступени развития в противоречие с ею же самой созданными потребностями производства»⁴⁰. А следовательно, не могла быть создана и наука о машинах.

На заседании Парижской академии наук 19 декабря 1699 г. Амонтон сказал: «Большое применение, которое все искусства должны находить машинам, является убедительным доказательством их абсолютной необходимости. Итак, чтобы не терять времени на доказательство этой мысли, удовлетворимся признанием того, что если имя машины иногда принимается недостаточно хорошо, если оно иногда подвергается презрению, то это происходит отчасти потому, что из-за недостаточного знания законов механики мы не всегда можем предвидеть точный эффект, который проектируемые машины дадут после изготовления. А в результате сего многие, не знающие этих законов, считают себя в праве не изучать их и попадают поэтому в страшную нелепость».

Ученые были еще не в состоянии создать науку о машинах. Некоторые познания у них имелись, но общая база отсутствовала.

Глава вторая

СТАНОВЛЕНИЕ МЕХАНИКИ МАШИН

Начало XVIII в. во Франции совпало с концом царствования Людовика XIV — самого яркого представителя абсолютизма. Завершился век Французской буржуазной революции. В течение этого столетия на сцену мировой истории вышли два государства, о которых в Западной Европе до этого мало знали, во всяком случае, немногие интересовались. Это были Россия — в самом начале века и Североамериканские Соединенные штаты — уже в конце века.

Самым важным событием в экономической жизни стран Западной Европы явилась начавшаяся в этом веке промышленная революция. Колониальная экспансия европейских стран, рост внутреннего потребления, возникновение новых рынков сбыта и связанный с этим рост спроса на товары, в первую очередь на ткани, вошли в противоречие с производственными возможностями мануфактуры. Изобретение новых машин и механизмов, при помощи которых можно было быстро увеличить количество товаров, выбрасываемых на рынок, становится жизненной необходимостью: начинается интенсивная изобретательская деятельность. Маркс неоднократно подчеркивал, что промышленная революция произошла в результате развития машин-орудий. Развитие универсального индустриального двигателя — паровой машины — явилось вторым этапом промышленной революции и определилось необходимостью получить удобный, мощный и передвижной привод для машин-орудий. «Когда Джон Уайетт в 1735 г. возвестил о своей прядильной машине», пишет К. Маркс, — а вместе с этим — о промышленной революции XVIII века, он ни звуком не упомянул о том, что осел, а не человек приводит эту машину в движение, и тем не менее эта роль действительно досталась ослу. Машина для того, «чтобы пряхть без помощи

³⁹ И. Ньютон. Математические начала натуральной философии. Пер. А. Н. Крылова. — В кн.: Собрание трудов акад. А. Н. Крылова, т. VII. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1936, с. 55—56.

⁴⁰ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 23, с. 381.

пальцев», — так говорилось в программе Джона Уайетта¹. Очень характерными являются слова программы: для промышленной революции были характерны не любые машины, а именно те, которые смогли заменить самую руку человека, его умение. «Итак, рабочая машина — это такой механизм, который, получив соответственное движение, совершает своими орудиями те самые операции, которые раньше совершал рабочий подобными же орудиями. Исходит ли движущая сила от человека или же, в свою очередь, от машины — это ничего не изменяет в существе дела»².

Развитие машин-орудий происходит в XVIII в. в странах Западной и Восточной Европы. В 1712 г. талантливый русский инженер и изобретатель А. К. Нартов³ построил токарно-копировальный станок оригинальной конструкции с суппортом вместо подручника. В течение второго десятилетия века он создал целую серию различных станков со сложными кинематическими схемами. В 1709 г. французский инженер и приборостроитель Никола Блон создал устройство для механизации процесса разметки зубьев для зубчатых колес часов и их нарезки; в 1724 г. А. К. Нартов построил зуборезно-фрезерный станок, на котором можно было нарезать зубья для любых машин. На протяжении первой половины века было создано много станков, были изобретены машины и в других отраслях производства, однако они не вызвали промышленного переворота: основную роль сыграли здесь машины текстильного производства.

Ручной труд ограничивал производственные возможности английской мануфактуры, и она не могла удовлетворить быстро растущего спроса на хлопчатобумажные и шерстяные изделия. Изобретение машин здесь оказа-

лось необходимым условием дальнейшего развития капиталистических отношений и машины нового типа буквально следуют одна за другой. В 1733 г. ткач и механик Джон Кей изобрел челнок-самолет, а прядильная машина Джона Уайетта явилась исходным пунктом для следующих крупных изобретений — прядильной машины Аркрайта и «Дженни» Харгривса. «Следует отметить, что оба великих изобретения, успех которых произвел революцию в текстильной промышленности, — пишет И. Манту, — появились почти одновременно: так называемая spinning-jenny Харгривса и water-frame Аркрайта отделены друг от друга одним или двумя годами. Изобретение water-frame относится, по-видимому, к 1767 г., а изобретение jenny — к 1765 г.; в употребление та и другая машина вошли в 1768 г., а патенты, так сказать их официальные метрические свидетельства, выданы соответственно в 1769 и 1770 гг.»⁴ Эти машины, а также механические ткацкие станки Вокансона (Франция, 1745), Картрайта (1785), мюль-машина Кромптона (1779) совершили переворот в обработке хлопка. Однако приводом все еще служит водяное колесо, и фабрики принадежны к рекам. Возникла необходимость в новом универсальном промышленном двигателе, и в 1789 г. Картрайт использовал для привода ткацких станков паровой двигатель.

«И даже паровая машина, — пишет Маркс, — в том виде, как она была изобретена в конце XVII века, в мануфактурный период, и просуществовала до начала 80-х годов XVIII века, не вызвала никакой промышленной революции. Наоборот, именно создание рабочих машин сделало необходимой революцию в паровой машине»⁵. На протяжении всего XVIII в. изобретатели многих стран упорно работали над созданием паровой машины, этого «подлинно международного изобретения», по определению Энгельса. Паровая машина начала XVIII в. применялась для привода горнозаводских насосов: такова была функция машины Ньюкомена (1705), в которой впервые двигатель был отделен от насосной установки. И. И. Ползунов создал паровую машину как промышленный двига-

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 23, с. 383.

Джон Уайетт (John Wyatt) — изобретатель начала XVIII в., плотник. Изобрел сверлильный станок, гарпун-самострел, дорожные машины, весы и др. Прядильная машина Уайетта была построена в виде модели в 1733 г.; тогда же на ней впервые без помощи руки человека была выпрядена хлопчатобумажная нить.

² К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 23, с. 385.

³ Андрей Константинович Нартов (1693—1756) — личный токарь Петра I. Много путешествовал. Принимал участие в организации Петербургской академии наук, заведовал ее инструментальными мастерскими, Первый советник Академии наук (1742), конструктор многих станков, автор монографии «Театрум машинарум» (ок. 1736 г., осталась в рукописи).

⁴ И. Манту. Промышленная революция XVIII столетия в Англии М., Соцэкгиз, 1937, с. 174—175.

⁵ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 23, с. 386.

тель (1763), но лишь после 1782 г. паровая машина приобрела функции фабричного универсального двигателя, отвечая тем самым настоятельной потребности зарождающейся крупнокапиталистической промышленности.

Изобретение и распространение машин, технологических и двигателей, и требования возникающего крупнокапиталистического производства повысили спрос на сами машины: машиностроение становится самостоятельной отраслью производства; строить машины вручную оказывается и дорого и медленно — возникают машиностроительные заводы. Растет ассортимент металлорежущих станков и повышаются требования к точности изготовления машин. В 1774 г. кузнец Джон Вилькинсон изобрел сверлильный станок, а вскоре после этого Уатт объявил, что он сможет гарантировать высокую точность выпускаемых им паровых машин: цилиндр диаметром 72 дюйма будет отличаться от абсолютной точности не более чем на толщину шестипенсовой монеты в наихудшей части. По словам Маркса, «существеннейшим производственным условием для производства машин с помощью машин была машина-двигатель, способная развивать силу в любой степени и в то же время всецело подчиняющаяся контролю. Она уже существовала в виде паровой машины. Но вместе с тем задача заключалась и в том, чтобы машинным способом придавать необходимые для отдельных частей машин строго геометрические формы: линии, плоскости, круги, цилиндры, конусы, и шары. В первом десятилетии XIX столетия Генри Модсли разрешил эту проблему изобретением поворотного сушпорта, который скоро был превращен в автоматический механизм и в модифицированной форме перенесен с токарного станка, для которого он первоначально предназначался, на другие машиностроительные машины. Это механическое приспособление заменяет не какое-либо особенное орудие, а самую человеческую руку, которая создает определенную форму, направляя, подводя резец и т. д. к материалу труда, например к железу. Таким образом стало возможным придавать геометрические формы отдельным частям машин «с такой степенью легкости, точности и быстроты, которую не смогла бы обеспечить и самая опытная рука искуснейшего рабочего»⁶.

Быстрое развитие парка машин и появление машин новых типов обусловило необходимость в теоретическом осмысливании всего этого богатства, в создании науки о машинах. Необходимость в ней чувствуется на протяжении всего столетия, и в книгах о машинах появляются не только описания отдельных машин, но и попытки прийти к некоторым общим заключениям. Отсутствие теории и соответствующей информации начало давать себя чувствовать и в практике создания машин. Случалось, что одни те же механизмы изобретались повторно. Характерна история с коленчатым валом, который был хорошо известен уже в XVI в. (он применялся тогда для ручного привода мельничных жерновов в целях «облегчения труда»). Но когда тот же коленчатый вал понадобился для преобразования поступательного движения поршня паровой машины во вращательное движение привода исполнительного органа, то оказалось, что он снова, в какой-то раз, изобретен и запатентован. Случилась эта неприятная история с Уаттом, когда он вплотную подошел к вопросу получения от паровой машины вращательного движения. Оказалось, что покойный Джеймс Пиккард из Бирмингема имел патент на применение коленчатого вала как способа приложения паровой машины к «вращению колес». Несмотря на то что, по выражению Уатта, «применение его (коленчатого вала. — А. Б.) к машине было подобно применению ножа, предназначенного для резки хлеба, к резке сыра», вплоть до окончания действия этого патента (1794) Уатту пришлось изыскивать иные методы преобразования поступательного движения во вращательное. Кинематика от этого выиграла. Правда, Уатт мог опротестовать патент Пиккарда, полученный на слишком старое и общеизвестное «изобретение», но он боялся, что в этом случае, по аналогии, могут быть поставлены под сомнение и некоторые из его патентов. Кроме того, в литературе есть указание на то, что несколько машин было построено Уаттом с коленчатым валом и до 1794 г.

Несколько особняком стоит в XVIII в. постройка автоматов. Родственное и генетически связанное с часовым искусством, искусство построения автоматов достигло в XVIII в. значительных успехов. Выдающимся изобретателем автоматов был И. П. Кулибин. Им была создана (1764—1767) «яичная фигура» — часы, величиной несколько меньше гусиного яйца. Описание действия часов сделано самим И. П. Кулибиным. В автобиографии он писал, что в этих

⁶ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 23, с. 396.

часах, кроме показа времени (часов и минут) «в доходе каждого часа» отворялись «створные дверки», находящиеся «внутри одного яйца», и там» виден чертог наподобие зала, в котором противу дверей поставлен в подобие гроба господня гроб...». У двери, заваленной «камнем», были поставлены «с копьями два стража». Через полминуты «в чертоге является ангел, камень отваливается и дверь разрушается, а стражи падают ниц». Спустя еще полминуты после этой сцены к ангелу приходят «жены-мироносицы» и слышится сопровождаемый звоном церковный стих «Христос воскрес», который повторялся три раза. Когда оканчивалась музыка, «створные дверцы» закрывались. Стих «Христос воскрес» и вся описанная сцена повторялись каждый час начиная с 8 часов утра до 4 часов дня. Вслед за этой сценой «каждый час можно было услышать другой церковный стих, «Воскрес Иисус из гроба». Помимо этих музыкальных номеров часы в 12 часов дня исполняли сочиненную Кулибиным музыку, на которую сам изобретатель переложил сочиненный им «кант» в честь приезда Екатерины II в Нижний Новгород в 1767 г. «Оный кант,— писал Кулибин,— продолжается минуты с четыре».

Механизм часов был сконструирован таким образом, что давал возможность прослушать каждую из трех музыкальных пьес в любое время. В этих часах имеются три самостоятельных механизма и три завода: часовой, боевой и курантовый, а также и автоматические приборы для приведения в действие механизмов, воспроизводящих сцены, музыку, бой и т. д. Существенными частями часового механизма были приводной барабан (завод), улитка (фюзеляж), колесная передача со стрелочным механизмом, цилиндрический ход и регулятор; имели свои существенные части и два других механизма: боевой и курантовый.

Как свидетельствует сохранившаяся опись частей, составленная Кулибиным, часы «яичной фигуры» состояли из 427 деталей. Все они были изготовлены исключительно точно и тонко¹. Кулибин строил и другие часовые механизмы и механизмы автоматов, но описанный является, вероятно, его шедевром.

Крупнейшим французским изобретателем автоматов

был Вокансон². Им были построены многие автоматы; но особенную сенсацию произвел его «флейтист», выполненный в 1736 г. Все движения этой фигуры были настолько продуманны, что изобретателя даже обвинили в подделке. По поручению Парижской академии наук фигура была освидетельствована, что доказало остроумие изобретателя.

«Незаконным детищем» механики оставалось изобретение «вечного двигателя». Правда, и Леонардо да Винчи, и Кардано знали о невозможности вечного движения, но многие механики продолжали «верить» в него и в XVII и XVIII в. (а также и в более позднее время), было предложено много таких «двигателей». Некоторые из них являлись прямым мошенничеством, но большинство были честными попытками увлеченных людей, не знавших законов механики. Связь между проблемой построения автоматов и проблемой «вечного движения» несомненна: и в том и в другом случае в XVIII в. побудительной причиной этих разысканий и изобретений была все та же теория Декарта о подобии между животным организмом и машиной, принявшая в творчестве философа-материалиста Ламетри (1709—1751) свое крайнее выражение.

Общее повышение интереса к задачам техники, и в первую очередь к задачам военной техники, стимулировало становление и развитие технического образования. До XVIII в. инженеров готовили путем индивидуального ученичества, что было очень медленно и дорого.

Первой вступила на путь школьной подготовки техники Россия. В эпоху реформ Петра I, начавшуюся в самые последние годы XVII в., «Московской Руси нужны были не общие идеи, в которых ощущала такую настоятельную нужду, например, Франция XVIII в., а технические знания. Этого рода знания и должны были приобретать русские люди, и силу исторической необходимости и по царскому приказу охватившие за границу»³. Техников не хватало, и для распространения необходимых сведений из области тех-

¹ Жак Вокансон (Jacques de Vaucanson, 1709—1782). С раннего детства занимался изобретательством. Известны его автоматы утка, игрок на флейте, игрок на тамбурине, шахматист. Создал и усовершенствовал ряд ткацких станков. С 1746 г. — член Парижской академии наук.

² И. Пехарский. Наука и литература при Петре Великом, т. I. Спб., 1862, с. 146.

¹ Н. М. Раскин. Иван Петрович Кулибин. М.—Л., «Наука», 1962, с. 42—44.

ники приглашались специалисты из-за рубежа; инженерному делу обучались солдаты в инженерных и артиллерийских частях, в полковых школах и даже учащиеся архиерейских школ и духовных семинарий. Во главу же угла было поставлено школьное обучение инженеров — метод, почти совершенно чуждый Западной Европе начала века. Генетически технические школы связаны были не с университетским образованием, а именно с индивидуальным ученичеством. В 1700 г. в Москве была открыта инженерная школа, в которой обучал инженер Грин с двумя помощниками, а 14 января 1701 г. был издан указ об учреждении школы «математических и навигацких, то есть мореходных хитростию искусств учения». Преподавали в Навигацкой школе «английские земли уроженцы» — бывший профессор Абердинского университета Фарварсон (Henry Farquharson), Степан Гвын (Stephen Gwynn) и Рыцарь Грыз (Richard Gries); несколько позже начал преподавать математику Л. Ф. Магницкий. План школы составил сам Петр, а в науку было велено набирать «добровольно хотящих, иных же паче и с принуждением». Учащихся в школе сначала было немного, затем ее контингент был доведен до ста человек. В 1715 г. на базе Навигацкой школы в Петербурге была открыта Академия морской гвардии, а Московская школа стала чем-то вроде ее подготовительного факультета.

С середины XVIII в. технические школы появляются в разных странах Западной Европы. В 1745 г. была открыта горная школа в Брауншвейге, в 1747 г. — школа мостов и дорог в Париже, в 1748 г. — школа королевского инженерного корпуса в Мезьере, сыгравшая особенно важную роль в истории науки о машинах (в разное время ее окончили Монж, Карно, Кулон, Понселе и Руже де Лилль — автор «Марсельезы»). Ко второй половине века относится организация ряда горных школ мировой известности: во Фрайбурге (1765), Петербурге (1774), Клаустале (1775), Париже (1778). К концу столетия число технических учебных заведений уже было значительным.

Преподавание механики в технических школах XVIII в. начинается почти одновременно с их основанием, но сам тип их накладывает определенные ограничения на метод изложения предмета и на его содержание. Первые школы были военно-инженерными, морскими, путевскими и горными, готовили они офицеров для коронной службы, а поэ-

тому при изучении машин особенное внимание уделялось подъемно-транспортным машинам, для элементарного расчета которых было достаточно статике «простых машин». Это отразилось и на первых учебниках этих школ.

Первым учебником русской школы, включавшим и технические статьи, стала «Арифметика» Леонтия Филипповича Магницкого (1669—1739) — одна из тех книг, которые М. В. Ломоносов называл «воротами своей учености». «Арифметика» была написана в качестве учебника для Навигацкой школы, ее содержание шире заглавия. В частности, технике посвящен раздел «О прикладах, потребных ко гражданству, яже чрез извлечение квадрата творится». Здесь приведен ряд технических расчетов и вычислений, сопровождающихся схемами. Есть и примеры, относящиеся к расчету и подбору зубчатых колес. Между прочим, Магницкий прямо говорил, что без этих знаний не может быть «совершен геометрик (геометрия бо зело есть потребна во всем обществе народа), ниже инженер не может быти, без него же невозможно быти ратоборцу...» Это первое упоминание в русской печати об инженерах¹⁰.

Первым посвященным механике трудом в русской технической литературе была книга Г. Г. Скорнякова-Писарева «Механика, или Наука статическая», изданная в Петербурге в 1722 г.

Существуют различные оценки этой книги. Представляется, однако, сомнительным, чтобы сам автор думал написать что-либо большее, чем элементарный учебник, предназначенный для удовлетворения неотложных потребностей учащихся технических школ петровского времени и руководстве по одному из важнейших предметов. Г. Г. Скорняков-Писарев родился во второй половине XVII в., бывал за границей и неплохо знал техническую литературу. Сперва он был преподавателем Морской академии, а потом назначен был ее президентом. В 1723 г. сослан за участие в заговоре против Меншикова. Умер в 1745 г.

Как и вся литература того времени, пытавшаяся дать какие-либо обобщения «по части машин», книга Скорнякова-Писарева сводит все машины к простым, или, как их именует автор, главнейшим машинам. Таких машин

¹⁰ Н. В. Данилевский. Русская техническая литература первой четверти XVIII в. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1954, с. 47.

автор насчитывает семь, разделяя рычаги первого и второго рода и выделяя в отдельную группу зубчатые колеса. По определению автора, «механика есть художество познавать веса и малыми силами чрез способ машин великия бремена двизати и подымати», причем механика «учит... всякия машины для движения и подъемов всяких бремен устояти». Теоретический уровень книги ничем не отличался от тогдашней западноевропейской литературы. Однако большая ценность книги состояла в том, что она представляла собой один из первых в мировой технической литературе учебник по прикладной механике, предназначенный для школьного преподавания. Причину сжатости и конспективности своей книги (36 страниц текста и 21 чертёж) автор поясняет в параграфе, озаглавленном «Практика художества статического или механического»: «Краткое некоторое истолкование оного художества. Пространное же истолкование будет впредь сочинившейся полной сего науки книги. Зде же за краткостию слов оставлено, да бы в науку художества сего вникающим многословием охоты не отнять».

Рассмотрим теперь самый большой и самый распространенный труд о машинах, который вышел в 1724 г. в Лейпциге, столице Саксонии, связанной тогда личной унией с Польшей. Это был первый том «Общего театра машин» — грандиозной работы Я. Лейпольда¹¹, посвященной общей теории машин. Написана книга на немецком языке, с большим количеством латинских слов, оборотов и целых выражений — настоящим научным языком того времени.

Лейпольд — активный творец науки о машинах; он не только описывает машины, подобно своим предшествен-

¹¹ Якоб Лейпольд (Jacob Leupold, 1674—1727). Родился в Планитце (Саксония). Учился в школе в Цвиккау, затем в Йенском и Виттенбургском университетах, где изучал теологию. Усиленным самообразованием приобрел глубокие познания в математике и практической механике. Преподавал в Лейпциге математику, затем работал экономом госпиталя. В 1715 г. был избран членом Берлинской академии наук. С 1725 г. работал правительственным комиссаром рудников и шахт. Много занимался изобретательством.

Главное произведение Лейпольда «Театр машин» (Theatrum machinarum) издано в 1724—1726 гг. в семи томах. Посмертно вышли восьмой и девятый тома. Известно, что материальную поддержку для издания своего грандиозного труда Лейпольд получил от Петра I.

никам, но и старается ввести в рассуждения элементы анализа.

В первой главе «Общего театра машин» Лейпольд определяет задачи механики: «Механика, или искусство движения, есть не только наука, которая учит нечто передвигать, используя силу или время, но также и искусство, на основании законов которого разного рода машины и инструменты ко всяким пунктам человеческой жизни можно изобретать и остроумно в работу запускать не только по необходимости, но и для удобства и к удовольствию»¹². Характерно определение машины: «Машина, или орудие (Rüstzeug), есть искусственное сооружение, с помощью которого можно получить полезное движение и нечто передвигать, сохраняя время или силу, чего иначе нельзя было бы сделать. Машины бывают простые и сложные. К простым машинам относятся так называемые пять приспособлений (Potentien), а именно: рычаг (vectis), полиспаст или блоки (trochlea), ворот с колесом и приводом (rota, dentata), клин (cuneus), винт (cochlea).

Сложные машины — те, которые состоят из двух или большего числа однородных или различных простых машин; сюда следует отнести все виды мельниц, фонтанов и т. д.

Машина отличается от инструмента тем, что с ее помощью можно произвести полезное механическое движение, чего не может сделать инструмент, почему не только мельницы, фонтаны и другие подобные большие машины, но также клещи кузнеца, ножницы портного, топор и илии лесоруба и другие подобные вещи следует считать машинами, поскольку они могут произвести движения, которые имеют свое обоснование в механике».

Подобное

¹² J. Leupold. Theatrum machinarum generale. Leipzig, 1724, S. 1.



Я. Лейпольд

расширение понятия машины не покажется странным, если учесть, что и Декарт относил к машинам и циркуль и даже линейку; таким образом, под понятие машины у него подпадает любой предмет, изготовленный человеком и служащий какой-либо цели¹³. Лейбпольд более последователен: свое изложение он начинает с «простых машин», из которых, по его мнению, состоят все сложные. Естественно, что в таком случае все предметы, состоящие из простых машин, суть машины.

При рассмотрении машин Лейбпольд расчленяет их, выделяя некоторые элементы (иногда — целые механизмы, а иногда — детали), и пытается в какой-то мере оценить их роль в машине и характер применения. Диапазон сведений о машине, известных ему, достаточно обширен. Он знает разные формы гибкого привода (табл. XIII) и зубчатых зацеплений, причем приводит данные, необходимые для построения зубцов. Ему известны цевочное зацепление (табл. XIV), червячное зацепление (табл. XVIII), элементы теории редукторов. Коленчатые валы он знает до трех колен (табл. XX), но применяет их, следуя старым авторам, только для привода мельничных поставов, как «удобное» приспособление для облегчения ручного труда (табл. XXII). Он сообщает, далее, некоторые сведения о построении кулачков (табл. XXIV), о собачках храповых колес и о других деталях стопорных механизмов (табл. XXVI). Объяснив в начале книги о построении сложных машин из простых и посвятив последним несколько параграфов, Лейбпольд затем совершенно забывает о них, тем более что само содержание его работы находится в логическом противоречии с первым положением.

Есть у Лейбпольда и ряд кинематических идей, которые дают право считать его в определенной степени предшественником Монжа. Они составляют содержание нескольких параграфов, в которых Лейбпольд излагает решение задач о преобразовании кругового движения в прямолинейное и прямолинейного в круговое. Однако примеры, приводимые Лейбпольдом, сложны и, несмотря на то, что он уже вплотную подошел к понятию механизма, сделать логического вывода из своих положений он не смог: в каждом случае преобразования движений он ищет под-

ходящую машину, которая смогла бы выполнить это преобразование.

Сочинение Лейбпольда представляет собой крупнейшее явление в технической литературе первой половины XVIII в.: в девяти томах «Театра машин» содержится описание всего богатства машин первой четверти XVIII в. Спрос на него был так велик, что потребовалось второе издание (1774). Известно, что Уатт изучил немецкий язык, для того чтобы прочитать «Театр машин», Кстати, Лейбпольд занимался и паровой машиной и в 1724 г. предложил применять избыточное давление пара; последнее было запатентовано Уаттом в 1769 г. «В третьем пункте патента он буквально повторяет слова Лейбпольда о применении избыточного давления «в тех случаях, когда не хватает холодной воды»¹⁴.

В первой половине века был сделан существенный вклад в кинематическую геометрию. Иоганн Бернулли¹⁵ показал, что в плоском движении фигуры ее можно перенести из заданного положения в любое другое путем вращения около неподвижной точки, которую Бернулли называл спонтанным центром вращения. Эта теорема несколько позже привлекла к себе внимание ученых и послужила как бы катализатором исследований в области геометрии движения.

Важную роль в деле распространения в XVIII в. технических знаний, в частности и знаний о машине, сыграл французский инженер и ученый Белидор¹⁶. В 30-х годах он начал публиковать свой трактат «Гидравлическая

¹³ И. И. Конфедератов. Джеймс Уатт — изобретатель паровой машины. М., «Наука», 1969, с. 49.

¹⁴ Иоганн Бернулли (Johann Bernoulli, 1667—1748). Теорема была опубликована им в 1742 г.

¹⁵ Бернар Форест де Белидор (Bernard Forest de Belidor, 1697—1761). Родился в Каталонии. Самостоятельно изучил математику и инженерное дело. В качестве военного инженера принимал участие в осаде ряда городов и крепостей, занимался фортификационными работами, позже был профессором математики в Ферраре. В 1725 г. Белидор опубликовал «Новый курс математики для артиллеристов и инженеров» (Nouveau cours de Mathématique à l'usage de l'artillerie et de génie) — учебник математики, содержащий арифметику, алгебру, геометрию, основы теории конических сечений, тригонометрию и элементы геодезии с большим количеством практических задач, а в 1729 г. — «Науку инженерного дела» (La Science des Ingénieurs) — учебник строительного искусства. С 1756 г. — член Французской академии наук.

¹³ Р. Декарт. Геометрия. Пер. А. П. Юшкевича. М.—Л., ГОНТИ, 1938, с. 29.

архитектура». Изданный в четырех больших томах (два тома первой части вышли в 1737—1739 гг., а два тома второй — в 1750—1753 гг.), трактат этот сразу обратил на себя внимание широтой охвата рассматриваемых технических проблем. Кроме вопросов гидравлики и гидротехники в нем излагались основы механики, теория «простых машин» со всеми относящимися к ней расчетами, элементы теории движения и удара тел, элементы теории трения. В практической части, если не считать строительства каналов, портов и иных гидротехнических сооружений, Белидор рассматривает много различных машин, силовых (водяные колеса) и технологических (мельницы), весьма подробно разбирая их действие. Подобно Лейбольду Белидор пытался приложить механику к исследованию машин. В основу своей работы он кладет все ту же устаревшую теорию «простых машин», не замечая, что его сочинение в части, касающейся машин, находится в коренном противоречии с этой теорией. Однако, как один из наиболее полных и подробных трактатов по практической механике, труд Белидора сыграл значительную роль в подготовке инженеров. Даже сейчас многие главы этой замечательной работы читаются с большим интересом.

Белидору принадлежит также попытка ввести в механику математические расчеты. Следует отметить, что на протяжении почти всего XVIII в. практические инженеры упорно отрицали возможность приложения математики к решению инженерных задач, несмотря на то что ученые достигли в этом направлении уже некоторых успехов¹⁷. Так, он заинтересовался подсчетом зубчатых колес мельниц. Обычно на одной оси с водяным колесом был закреплен «фонарь», представлявший из себя два деревянных диска, связанных некоторым числом шипов, расположенных по окружности. Шипы «фонаря» вступали в зацепление с зубьями колеса, которое и приводило в движение рабочий

орган мельницы. Число шипов обычно принималось равным десяти и диаметр шипа выбирался так, чтобы он мог вынести наибольший груз.

Был предложен следующий способ расчета элементов зацепления: следует разделить диаметр шипа на 8 равных частей и принять расстояние между двумя соседними шипами равным семи таким частям. Тогда окружность при 10 шипах будет содержать 150 частей. Если диаметр шипа равен 2,5 дюймам, то окружность будет примерно равна 47 дюймам (окружность центров шипов). Начальная окружность колеса подсчитывается в зависимости от требуемого передаточного отношения.

Наибольшим допустимым числом шипов «фонаря» считалось 20. Шип и зуб находились в контакте обычно при повороте «фонаря» на 18°. Толщина зуба принималась пропорциональной диаметру шипа¹⁸.

Белидор считал, что форма зубьев может быть произвольной, однако для удобства их следовало бы профилировать по эписпиралоиду, как учил Лагир.

Тем временем теория ушла уже дальше. В 1733 г. французский математик Камю¹⁹ опубликовал мемуар, в котором, основываясь на работах Лагира, углубил теоретическое исследование зацеплений. В 1752 г. он указал на простой метод построения циклоидальных зубьев. Позже, в 1766 г., он сделал попытку геометрического построения конического зацепления при помощи сферической эписпиралоиды. Однако он не смог построить касательную к этой кривой двойкой кривизны.

Примерно в эти же годы началось и практическое применение полученных результатов. Видный английский инженер Смитон²⁰ в 1753 г. провел ряд экспериментов с ветряными и водяными мельницами и пришел к выводу,

¹⁷ До конца века объем математических знаний, требуемых для подготовки инженера, не превышал программы современной средней школы. Это в оптимальном случае. По указу Петра I от 21 февраля 1721 г. «Нужнейшая часть Инженерства: 1) Пять частей арифметики, а по самой крайней нужде хотя одна нумерация. 2) План геометрия со всем циркульными приемами. 3) Масштаб, по которому мог бы чертить на бумаге и после оное перевести на землю к делу...» (А. Савельев. Исторический очерк инженерного управления в России. СПб., 1879, с. 58).

¹⁸ C. St. Davison. Geared Transmission, Engineering Heritage, v. I. London, 1963, p. 121.

¹⁹ Шарль Камю (Charles Camus, 1699—1768) — математик, член Французской академии наук (1727). Принял участие в споре о мере движения (1728). Вместе с Мопертюи и Клеро участвовал в экспедиции для градусного измерения под полярным кругом.

²⁰ Джон Смитон (John Smeaton, 1724—1792) — механик и гидротехник. Член Королевского общества (1753). Занимался усовершенствованием водяных колес, начал применять для зубчатых колес мельниц чугунные валы и зубья. Исследовал динамику водяных и ветряных двигателей.



Д. Смитон

что секрет равномерного вращения колес заключается в профилировании их зубьев по циклоиде.

Как мы уже отмечали выше, механика постепенно входила в число предметов, излагаемых в школе; вместе с ней излагались и элементы познаний о машинах. Но занимались этими исследованиями математики, а посему учение о машинах вместе с механикой до самого конца XVIII в. «числится по математике» и входило в состав прикладной, или «смешанной», математики. Так, Христиан Вольф²¹ излагал начала учения о машинах во второй части своих «Основ

всеобщей математики» (1713). Философ-энциклопедист, считавший весь мир совершеннейшей машиной, Вольф применил для изложения этого учения «математический метод», который на деле оказывается сухим каталогизированием. Хорошее представление о сумме знаний в области науки о машинах в середине XVIII в. дает небольшая книжка Эбергарда²² — одного из учеников Вольфа — «Учебник прикладной математики». Рассмотр-

²¹ Христиан Вольф (Christian von Wolff, 1679—1754) — немецкий философ и физик, профессор Галльского, а затем Марбургского университета (где его лекции слушал М. В. Ломоносов). Интересно содержание его «Основ всеобщей математики» (Elementa matheseos universale). Том первый содержал арифметику, геометрию, тригонометрию и строительное искусство; том второй — артиллерию, фортификацию, механику (включая машины), гидростатику, аэрометрию и гидравлику; том третий — оптику, катоптрику, диоптрику, перспективу, сферическую тригонометрию, астрономию, хронологию, географию и гномонику; том четвертый — алгебру, основания дифференциального и интегрального исчисления. Этот труд Вольфа выдержал десять изданий.

²² Иоганн Эбергард (Johann Peter Eberhard, 1727—1779) — профессор медицины (1756), математики (1766) и физики (1769) в Галле, член Леопольдовской академии наук. Работы по оптике и горным машинам.

рение машин автор начинает с «практического применения различных простых механических инструментов» (Werkzeuge), к которым относит рычаг, наклонную плоскость, винт, клин, колеса, водяные колеса, служащие для мельничного привода, и зубчатые колеса. Далее следуют «сложные машины». Мельницами автор называет «такие машины, которые с помощью приспособленных колес и приводов получают вращательное движение, используемое для приготовления различных веществ». Автор добавляет при этом, что мельницы отличаются от кранов или иных «также из колес составленных машин» тем, что на них вырабатываются определенные вещества: мука, порох, бумага и др. Таким образом, для него совершенно ясна разница между технологическими и подъемными машинами, несмотря на подобие состава. Интересно, что Эбергард указывает как на характерный признак машин вообще на «колеса», а не на «простые машины», названные им «инструментами».

Эбергард излагает в своей книге классификацию мельниц. Он систематизирует их по типу привода (водяные, петряные, с животным приводом) и по назначению. Он выделяет мельницы для измельчения веществ (зерновые, круподерки, для помола пряностей, для помола кофе), мельницы для прессования (маслобойки, пороховые мельницы и пр.), причем этот разряд делит в свою очередь на мельницы с толчеей, молотовые, режущие (каменерезки, пильные мельницы), сверлильные и шлифовальные²³. Таково было состояние технологических установок перед промышленным переворотом. Количество операций, которые выполняла каждая такая установка, было небольшим, и все они были трудоемкими. Если добавить сюда краны, горнозаводские подъемные машины и часы, то перечень среднего уровня машинной техники первой половины XVIII в. будет достаточно полным.

Но, как указывал К. Маркс, «в мельнице с самого начала, с тех пор как была создана водяная мельница, имелись все существенные элементы организма машины: механическая двигательная сила; первичный двигатель, который она приводит в действие; передаточный механизм; и, наконец, рабочая машина, захватывающая материал; все эти элементы существуют независимо друг от друга.

²³ J. P. Eberhard. Beiträge zur Mathesi Applicata. Halle, 1757, S. 32.

На примере мельницы было создано учение о *трении*, а вместе с тем были проведены исследования о математических формах зубчатой передачи, зубьев и т. д. На ее же примере впервые было разработано учение об измерении величины двигательной силы, о лучших способах ее применения и т. д. Почти все крупные математики начиная с середины XVII столетия, поскольку они занимаются практической механикой и подводят под нее теоретическую основу, исходят из простой водяной мельницы для помола зерна. Отсюда и название *Mühle* и *mill* (мельница.— *Ред.*), которое стали применять ко всякому механическому двигателю, употребляемому для практических целей; это название возникло в мануфактурный период.

Но в мельнице совершенно так же, как и в прессе, механическом молоте, плуге и т. п., собственно работа, т. е. удары, расплющивание, размалывание, раздробление и т. д., производится с самого начала без человеческого труда, даже если двигательной силой является человек или животное. Оттого-то этот род машин, по крайней мере в своем первоначальном виде, очень древнего происхождения, и в них раньше, чем в других, применялась собственно механическая двигательная сила. Оттого-то они и являются почти единственными машинами, которые мы встречаем в период мануфактуры. *Промышленная революция* начинается тогда, когда механизм применяется там, где издавна для получения конечного результата требовалась работа человека, следовательно, не там, где, как в вышеописанных орудиях, к собственно обрабатываемому материалу рука человека с самого начала *никогда* не прикасалась. Иначе говоря, промышленная революция начинается с применения механизма там, где человек, по самой природе вещей не действует с самого начала лишь как простая *сила* ²⁴.

Существенный вклад в становление науки о машинах был сделан в XVIII в. учеными и практиками России. Ее экономическое развитие, выразившееся в промышленном взлете в первой половине века, следует рассматривать с учетом не только уровня развития, достигнутого к тому времени, но и темпов его. Надо учесть также характерные для России черты промышленного развития — мануфак-

турный способ производства, основанный не на вольнонаемном, а на рабском труде, и частое вмешательство государства во внутренние дела промышленника — регламентация производства и продукции.

От XVII в. Россия петровской эпохи унаследовала слабо развитую мануфактурную промышленность и экономику, основанную на феодально-крепостническом способе производства. Потребность в быстром развитии ведущих отраслей промышленности — горнодобывающей, металлургической и металлообрабатывающей — задержала перестройку общественных отношений: на протяжении почти всего XVIII в. русская мануфактура развивалась на базе принудительного труда крепостных или «приписных» рабочих.

До XVIII в. в России вся металлургическая и металлообрабатывающая промышленность была сосредоточена «под боком» у Москвы — в Тульском районе. При резко увеличившемся спросе на металл этого оказалось недостаточно, и в первой четверти века возникли новые центры производства металла — Средний Урал, Карелия, Воронеж. Из 200 мануфактур того времени производили металл 70 заводов. В 1750 г. Россия выплавляла $\frac{1}{6}$ всего мирового производства чугуна. В районах к востоку от Москвы возникла новая отрасль мануфактурного производства — текстильная промышленность.

В связи с начавшимся на Западе промышленным переворотом резко повысился спрос на русский чугун, и Россия вышла по чугуну на первое место в мире. В 1780 г. выплавка чугуна в России составила 6700 тыс. пудов, из них было вывезено за границу 3800 тыс. пудов, что превысило выплавку Англии в том же году (2440 тыс. пудов). Однако к этому времени феодально-крепостническая база мануфактуры уже изжила себя и явилась тормозом на пути дальнейшего промышленного развития. Страны, в которых проходил промышленный переворот, начали догонять Россию: в 1800 г. Англия сравнялась с Россией по выплавке чугуна — обе страны выдали приблизительно по 9,5 млн. пудов.

Итак, к концу XVIII в. Россия пришла в числе наиболее развитых в промышленном отношении стран с сильной мануфактурной промышленностью (количество мануфактур достигло 2300). Техническая база промышленности в общем была подобна западноевропейской, маши-

²⁴ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 30, с. 263—264.

ны применялись главным образом на трудоемких работах. К концу века возросло применение машин-орудий, появились и первые признаки начинающейся промышленной революции; в промышленность начал проникать вольнонаемный труд; к 1800 г. количество вольнонаемных рабочих достигло 40%.

Бурные темпы развития русской мануфактуры не могли не отразиться и на развитии русской технической культуры. На протяжении всего века изобретения по части машин следуют одно за другим: на тульских заводах М. В. Сидоров, Я. Батищев и П. Захава создают ряд металлообрабатывающих станков и установок, благодаря которым металлообработка была доведена до высокой степени совершенства. В 1763 г. на тульском заводе уже внедрялась взаимозаменяемость деталей при производстве ружей. В 1760 г. в г. Серпейске Калужской губернии Р. Глишков построил 30-веретенную машину для прядения льна с приводом от водяного колеса и мотальную машину. Около 1775 г. уральский крепостной Е. Г. Кузнецов построил прокатный стан непрерывного действия, листопркатный стан, ножницы для резки металла и «между делом» — астрономические часы-автомат. Выше упоминалось о паровой машине И. И. Ползунова (1728—1766), которая была первой машиной для привода заводских машин.

Крупнейшим русским механиком века был И. П. Кулибин. Родился он в 1735 г. в Нижнем Новгороде, был выучен только грамоте, затем самостоятельно изучил механику и часовое дело. В 1769 г. он был назначен механиком и заведующим мастерскими Академии наук; здесь он создал ряд машин и приборов. К последней трети века относится техническое творчество знаменитого алтайского гидротехника К. Д. Фролова (1726—1800), который создал на Змеиногорском руднике уникальную гидросиловую установку.

На рубеже первой четверти XVIII в. происходит становление русской науки. Нам неоднократно придется обращаться к отдельным страницам истории Петербургской академии наук, сыгравшей чрезвычайно значительную роль в развитии механики машин. 28 января (8 февраля) 1724 г. Петр I утвердил доклад своего лейб-медика Блюментроста об организации «Академии наук и курьезных художеств» и университета при ней. Среди предметов преподавания

названа была и механика. Открыта была Академия наук уже после смерти Петра, при Екатерине I, фактическим правителем государства А. Д. Меншиковым. Первым ее президентом стал Л. Л. Блюментрост (1692—1756). В число первых ученых, приглашенных вступить в состав академии, были математики Я. Герман, Н. и Д. Бернулли, Л. Эйлер.

Ученик Я. Бернулли Яков Герман (1678—1733) был первым ученым, получившим в России звание академика. Еще в 1716 г. он издал в Амстердаме работу «Форономия или две книги о силах и движениях твердых и жидких тел», где изложил принцип, явившийся базой становления кинестатики.

Принцип этот впервые был намечен самим Я. Бернулли в 1703 г. Последний использовал принцип статики для описания движения сложного маятника. При этом он впервые пошел в рассмотрение силы инерции. Я. Герман применил свой принцип к физическому маятнику. Он разлагал силу тяжести материальной точки на две составляющих. «Одна, направленная вдоль отрезка, соединяющего эту точку с точкой подвеса, уравновешивается реакцией связи в точке подвеса; другая, перпендикулярная к указанному отрезку, равна... касательной силе инерции. Таким образом, в каждой точке маятника приложены следующие силы: 1) составляющая силы веса точки, направленная вдоль радиуса-вектора этой точки; 2) реакция оси на эту составляющую, равная ей по величине и направленная вдоль радиуса-вектора в противоположную сторону; 3) составляющая силы тяжести точки, перпендикулярная к радиусу-вектору; 4) кроме того, со стороны точки на связь действует сила, численно равная массе точки, умноженной на ее ускорение. Силы 1 и 2 на основании третьего закона Ньютона образуют уравновешенную систему сил. Силы 3 и 4 приложены к разным телам (к точке и к связи), поэтому говорить об их уравновешивании не имеет смысла. Но если силу 4 мысленно приложить к данной материальной точке, то в этом случае силы 3 и 4 будут взаимно уравновешены. Так как это рассуждение приложимо к каждой точке маятника, то оно справедливо и для маятника в целом. Поэтому, рассматривая маятник как систему точек, можно сформулировать следующий принцип: система внешних сил, приложенных к точкам механической системы, реакций связи и мысленно приложенных к точ-

кам системы сил инерции в каждый момент времени образует уравновешенную систему сил»²⁵.

Герман не сформулировал принцип, и проблема была завершена Эйлером, который применил этот принцип к решению различных задач динамики.

Леонард Эйлер родился в Базеле в 1707 г. в семье пастора. Начальное образование получил дома, затем слушал в Базельском университете медицину и у И. Бернулли математику. В 1727 г. по рекомендации Д. Бернулли был приглашен адъюнктом математики в Петербургскую академию наук, с которой и связал свою жизнь. В 1733 г. он занял кафедру математики. Работая затем с 1741 по 1766 г. в Берлинской академии наук, он оставался почетным членом Петербургской академии наук и выполнял ее поручения, а труды свои публиковал в журналах обеих академий. В 1766 г. Эйлер вернулся в Петербург, где работал до дня своей смерти — 18 сентября 1783 г.

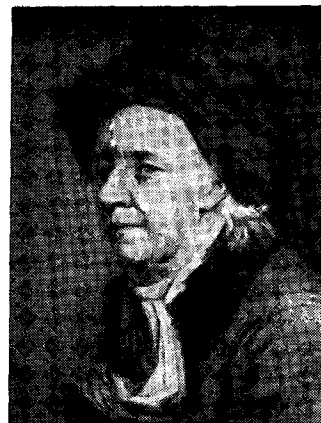
Один из величайших математиков мира, «Эйлер обладал в высшей степени тем, что называется эрудицией; он читал все, что уцелело от лучших римских писателей; Энеиду, например, он знал всю наизусть, от начала до конца. Но, вещь замечательная, читая Virgilia, он не терял из виду математики.

У Эйлера было великое искусство не выставлять напоказ своей учености, скрывать свое превосходство и быть на уровне всех и каждого. Всегда ровное расположение духа, веселость кроткая и естественная, некоторая насмешливость с примесью добродушия, разговор наивный и шуточный — все это делало беседу с ним столько же приятной, сколько и привлекательной. Чрезвычайная живость иногда была причиною, что он легко раздражался, но гнев проходил у него так же быстро, как появлялся, и он ни на кого не досадовал долго»²⁶.

Эйлер посвятил науке о машинах ряд трудов, статей и заметок. Он внес существенный вклад в общую теорию машин, в кинематику, кинетостатику, теорию гидравлических и втяжных двигателей, теорию трения, теорию зубчатых зацеплений, кинематическую геометрию, теорию

гибких звеньев. Три мемуара посвящены общей теории машин. Первый из этих мемуаров — «О наивыгоднейшем применении простых и сложных машин» — еще целиком основывается на теории «простых машин»²⁷. Новым является то, что Эйлер рассматривает их не в состоянии покоя, а в движении. Этот «динамический» подход, свойственный одному из творцов динамики, ярко проявился в двух следующих мемуарах — «О машинах вообще» и «Принципы теории машин»²⁸,

в которых, в сущности, поставлены были все основные вопросы науки о машинах. Здесь Эйлер подвергает резкой критике теорию «простых машин», показывая, что она не может ничего пояснить, ибо основное в машинах — движение, поэтому их следует изучать не в состоянии покоя, а в движении. В мемуаре «О машинах вообще» Эйлер отметил, что решить основные задачи теории машин, пользуясь лишь способами элементарной механики, без высшего анализа невозможно, на что давно уже обратили внимание те, кто работают с машинами. Несмотря на то что значительное число машин сооружается с помощью законов статистики, невозможно предусмотреть их действия, не проводя экспериментального исследования. И Эйлер приходит к выводу, что «обычное познание машин, предлагаемое элементарной механикой, чрезвычайно неполно и совершенно не заслуживает имени теории»²⁹.



Л. Эйлер

²⁵ И. Б. Погребысский, Л. С. Фрейман. Аналитическая механика. — В кн.: История механики с древнейших времен до конца XVIII в. М., «Наука», 1971, с. 140.

²⁶ С. А. Порошин. Записки. СПб., 1844, с. 151.

²⁷ L. Euler. De machinarum tam simplicium quam compositorum usu maxime lucroso. — «Commentarii Academiae Scientiarum Petropol», 1747, t. X.

²⁸ L. Euler. De machinis in genere. — «Novi Commentarii Academiae Scientiarum Petropol», 1753, t. III; Principia theoriae machinarum. — «Novi Commentarii...», 1763, t. VIII.

²⁹ «Ex quibus clarissime perspicatur, cognitionem Machinarum vulgarem qualis in Mechanicae elementis expositur, maxime esse mancam, nihilque minus Theoriae nomen mereri».

Теория должна быть такой, чтобы с ее помощью можно было «среди всех машин, применяемых для выполнения определенной работы, найти такую наилучшую, которая выполнила бы эту работу в кратчайшее время или с минимальной затратой действующих сил, или иным способом, который сможет обеспечить получение наилучшего результата»³⁰.

Особенно интересным является § 11 мемуара, в котором Эйлер исследует структуру машин. Здесь он указывает на те три составные ее части, которые в XIX в. были определены как двигатель (или приемник), передача и рабочий орган. «Итак, во всех машинах,— говорит он,— следует рассматривать три вещи: во-первых, саму силу, которая приводит машину в движение, во-вторых, саму машину, или ее структуру, т. е. совокупность частей, из которых она состоит, в-третьих, движущийся груз»³¹. Здесь же Эйлер намечает исследование коэффициента полезного действия.

Вторая часть мемуара посвящена исследованию силы трения, возникающей при движении частей машины. Для упрощения Эйлер рассматривает лишь элементарные случаи. Сила трения, по Эйлеру, происходит от шероховатости соприкасающихся тел и от их взаимного сдавливания. Площадь соприкосновения не влияет на величину трения (ссылка на опыты Амонтона), причем если шероховатость равномерна, то сила трения прямо пропорциональна давлению; коэффициент пропорциональности Эйлер считает постоянным и равным $\frac{1}{3}$. В общем случае

$$F = \frac{1}{n} Q,$$

где F — сила трения, Q — нагрузка, $n \cong 3$.

Мемуар «Принципы теории машин» также посвящен исследованию динамических явлений в машинах. Здесь Эйлер пытается дать классификацию машин, основанную на технологических (как это было общепринято) признаках, а на механических характеристиках машин. Он

предлагает разделить машины на два класса; к первому он относит машины, все части которых находятся в равномерном движении,— грузоподъемные машины, мукомольные мельницы и т. д. Ко второму классу относятся машины, отдельные части которых в процессе движения или ускоряются, или замедляются, хотя машина в целом может находиться в состоянии равномерного движения. К этому классу Эйлер относит машины и мельницы ударного действия, машины с кривошипно-шатунным механизмом, часы всех видов, водоподъемные машины. Таким образом, второй класс оказывается значительно шире первого. В этом же мемуаре Эйлер набрасывает некоторые задачи динамики машин, в частности (§ 16), касается понятия коэффициента полезного действия, правда, в неявной форме.

Вопросу профилирования зубчатых колес посвящены два мемуара Эйлера³². В них он обосновывает и развивает аналитическую теорию эвольвентного зацепления и, в частности, доказывает невозможность построения цилиндрического зацепления с постоянным передаточным отношением, в котором отсутствовало бы скольжение между поверхностями зубьев, находящимися в соприкосновении. Он отметил также, что как циклоидальный, так и эвольвентный профили можно приближенно выполнить с помощью дуг окружностей.

В 1765 г. Эйлер получил уравнение, связывающее радиусы кривизны взаимоигибаемых кривых и центроид, разлитое впоследствии Савари.

Одновременно с Даламбером Эйлер занимался исследованием движения тела в пространстве. Даламбер в 1749 г. показал, что всякое бесконечно малое перемещение неизменяемой системы, имеющей неподвижную точку в пространстве, можно представить как элементарное вращение ее вокруг мгновенной оси, проходящей через неподвижную точку. Эту теорему Эйлер доказал в 1750 г. геометрическим путем. В 1775 г. он показал, что всякое конечное перемещение тела в пространстве можно выполнить с помощью одного поступательного и одного вращательного движения, следующих друг за другом. Несколько раньше, в 1763 г.,

³⁰ L. Euler. De machinis in genere.— «Novi Commentarii...», 1753, t. III, p. 8.

³¹ «In omni autem Machina tres res sunt considerandae: primo scilicet vis, quae Machinae motum inducit; secundo ipsa Machina, seu eius structura, partiumque quibus constat coagmentatio; ac tertio onus movendum».

³² L. Euler. De optissima figura rotarum dentibus tribuenda.— «Novi Commentarii...», 1750, t. V; Supplementum. De figura dentium rotarum.— «Novi Commentarii...», 1767, t. XI.

Мощи³³ показал, что всякое перемещение твердого тела в пространстве эквивалентно винтовому.

Весьма большое значение для развития учения о машинах имел мемуар Эйлера «Общие формулы перемещения твердых тел», в котором впервые было указано на необходимость выделения науки о движении в отдельный раздел механики³⁴.

Этим не ограничивается вклад Эйлера в создание науки о машинах. В первой половине века венгерский ученый Сегнер (1704—1777) создал прообраз гидравлической турбины — сегнерово колесо. Эйлер в письмах к Сегнеру дал ряд советов, как улучшить это колесо; тогда же проект Сегнера был осуществлен. В течение ряда лет Эйлер разработал теорию гидроактивного колеса, которую опубликовал в пяти мемуарах (1752—1764).

Важные результаты в области механики, впоследствии использованные механикой машин, получил Д'Аламбер в «Трактате о динамике», вышедшем в 1743 г. Жан Лерон Д'Аламбер (1717—1783) был одним из самых блестящих ученых века. Он изучал математику, право и медицину; за два трактата, представленные в 1739 и 1740 гг., о движении твердого тела и об интегральном исчислении он был в 1741 г. избран членом Парижской академии наук.

Принцип, носящий имя Д'Аламбера, был опубликован им во второй части «Трактата по динамике». Сам Д'Аламбер не считал понятие силы достаточно ясным, поэтому обходился без этого понятия и без понятия «сил инерции». В его формулировке принцип гласит: «Нужно движения, передаваемые... телам, разложить каждое на два движения, α и α , β и β , γ и γ и т. д., причем... если телам будут переданы лишь движения α , β и т. д., то тела будут оставаться в покое»³⁵. Таким образом, сам принцип не дает условий равновесия, а лишь выделяет группу движений, к которым и следует применить эти условия. Впо-

следствии в этот принцип ввели понятие силы, а затем и формулировка его была изменена так, чтобы принцип можно было применять для решения технических задач.

Следует отметить, что аналогичным путем шел и Эйлер, который обобщил и завершил принцип Германа, создав так называемый «Петербургский принцип»³⁶. В соответствии с этим принципом тело находится в равновесии под действием приложенной силы, реакции связи и мысленно приложенной к нему силы инерции.

Д'Аламбер был не только математиком, но и очень влиятельным философом. Вместе с Дени Дидро и несколькими единомышленниками он принял участие в издании многотомного труда, который должен был охватить всю совокупность знаний и проложить пути для создания новых наук. Этот труд — «Энциклопедия, или пояснительный словарь наук, искусств и ремесел» — начал выходить в 1751 г. В результате очень большой и напряженной работы «энциклопедистов» («Энциклопедию» не раз запрещали за свободомыслие статей), издание ее все же было закончено. В 1751—1765 гг. вышло 17 томов, в 1762—1772 гг. — 11 томов иллюстраций. В 1776—1777 гг. были изданы четыре дополнительных тома и том иллюстраций, в 1780 г. вышел указатель ко всему изданию в двух томах. Таким образом, полная «Энциклопедия» состояла из 36 томов. Значительную часть иллюстраций составили рисунки машин. Однако Дидро, которому принадлежало решающее слово в издании «Энциклопедии», не понял уже начавшегося процесса технической революции. Лучшими примерами «механических» искусств он считал традиционные ремесла, но не интересовался во-



Ж. Л. Д'Аламбер

³³ Джулио Джузеппе Мощи дель Гарто (Giulio Giuseppe Mozzi del Garto, 1730—1813) — математик и политик. Член флорентийского правительства, премьер-министр (1801). президент Флорентийской академии наук (1808). Работы в области кинематики и динамики.

³⁴ L. Euler. Formulae generales pro translatione quacunque corporum rigidorum. — «Novi Commentarii...», 1776, t. XX, p. 189.

³⁵ J. L. d'Alembert. Traité de dynamique. Paris, 1743. Русский пер.: Ж. Д'Аламбер. Динамика. Пер. и примеч. В. П. Егоршина. М. — Л., Гостеоретиздат, 1950.

³⁶ Термин предложен Н. Д. Моисеевым. См.: Н. Д. Моисеев. Очерки развития механики. М., Изд-во МГУ, 1961, с. 305 и сл.

просом возможности научного пояснения действия машин. Поэтому, в частности, «Токарь» поясняется на 87 таблицах, тогда как для паровой машины отведено всего пять. «Энциклопедия» полностью принадлежала в этом отношении к мануфактурному периоду и в своей технической части как бы суммировала его результаты. Характер и направленность технических статей «Энциклопедии» резко и едко охарактеризовал Реомюр³⁷, который заметил: «у сына пожевых дел мастера (т. е. у Дидро) атавизм проявляется в содержании написанных им статей относительно технических искусств».

Почти одновременно с «Энциклопедией» было предпринято и другое посвященное машинам издание, руководил которым сам Реомюр. Еще в 1711 г. он получил от Парижской академии наук задание собирать материалы, относящиеся к машинам. Однако прицел у него был иной и издание должно было адресоваться не самым широким слоям населения (как «Энциклопедия»), а ученым, чтобы заинтересовать их вопросами техники и привлечь их к ее развитию. Реомюр указал на то, что необходимо научное пояснение технологических процессов, их усовершенствование, и на то, что для руководства производством необходимы инженеры-специалисты (каковых тогда не существовало).

Собранные Реомюром материалы («Описание искусств и ремесл») начали выходить в издании Парижской академии наук лишь после его смерти: с 1761 по 1789 г. вышла 121 часть «Описаний», содержащих свыше 1000 таблиц.

Великий русский ученый-энциклопедист М. В. Ломоносов (1711—1765) в своем научном творчестве также неоднократно касается вопросов, относящихся к машиноведению. В «Первых основаниях металлургии»³⁸ он посвящает отдельные главы подъемным машинам, «которыми из ям худой воздух выгоняют и вместо него чистый впускают». Он описывает, в частности, устройство для передачи работы от одного колеса на несколько «мельниц», загрузочную машину и др. Однако никаких обобщений в части

практической механики он не дает, удовлетворяясь описанием конструкции и способа действия отдельных машин.

Быстрое увеличение парка машин, появление новых машин, новые технологические процессы — это не могло не обратить на себя внимания ученых. Однако в течение века все, что издавалось «по части машин» («Театр машин» Лейпольда, «Энциклопедия», «Описания» Парижской академии наук), — все это находилось на уровне первой половины века. И лишь в ряде отдельных мемуаров Эйлера и других ученых пробивается новая

струя; ей и суждено было развиваться в науку о машинах. Тема динамики машин появляется в середине XVIII в.; генетически она была связана с необходимостью качественно и количественно оценивать «мощность» или «работу» (содержание этих терминов в XVIII в. не было выяснено), получаемую от различных источников энергии. Таковыми были: сила человека и животных, сила ветра и воды и, наконец, сила пара. Естественно, что начали изучать энергетические возможности человека, сила которого в XVIII в. составляла весьма существенную часть в энергетическом балансе европейских стран. Одним из первых работоспособность человека исследовал Лагир, проводивший некоторые эксперименты в этом направлении. Далее, знаменитый французский инженер маршал Вобан (1633—1707) выполнил большое число опытов и составил инструкцию по соответствующим нормативам. Материалы Вобана опубликовал Белидор в своей «Науке инженерного дела» (1729).

Силу человека изучали Ламберт (1728—1777), Прони³⁹.



М. В. Ломоносов

³⁷ Рене Антуан Реомюр (René Antoine de Réaumur, 1683—1757) — французский физик и естествоиспытатель, член Парижской академии наук (1708). Работы в области физики, биологии, металлургии. Создатель 80-градусной термометрической шкалы.

³⁸ Опубликованы в 1763 г. См.: М. В. Ломоносов. Полное собрание сочинений, т. 5. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1954.

³⁹ Гастон Клер Франсуа Риш де Прони (Gaston Claire François Riche de Prony, 1755—1839) — французский инженер и физик, член Парижской академии наук (1795), директор Школы мостов и дорог (1798), изобретатель измерительного тормоза (тормоз Прони, 1821).

Кулон⁴⁰ интересовался вопросом движения человека с грузом; он нашел, что работа, которую может выполнить человек без груза, так относится к работе, выполняемой с грузом в 58 кг, как 7 к 4.

Силу лошади изучали Лагир и Камю. Камю нашел, в частности, что колеса большого диаметра имеют преимущество при сооружении повозок, что упряжка должна быть расположена горизонтально, что толкание выгоднее тяги, и т. д.

Большой интерес ученых привлекла к себе динамика гидравлических двигателей. Для определения давления воды была придумана установка: вода поступала на колесо сверху и приводила его в движение. На вал колеса был намотан канат с прикрепленным к нему грузом, падение которого заставляло колесо вращаться в противоположном направлении. Таким образом, задача заключалась в уравновешивании всей системы под действием воды и груза.

Ньютон, а затем Мариотт и Лагир подошли к решению этой задачи с точки зрения статики, и лишь Паран⁴¹ указал на то, что следует учитывать скорость вращения колеса. По его мнению, колесо не могло бы вращаться с окружной скоростью, равной скорости потока: в этом случае не преодолевалось бы сопротивление и отсутствовало бы действие. Но если бы не было движения, то действие также равнялось бы нулю. Продолжая это рассуждение, Паран пришел к выводу, что скорость колеса должна равняться $\frac{1}{3}$ скорости потока. Мнение Парана поддерживали Белидор, Маклорен и Эйлер, и лишь в 1767 г. Борда установил, что окружная скорость колеса должна равняться половине скорости потока.

Жан Шарль Борда (1733—1799), военный инженер, физик и геодезист, в 1756 г. был избран в Парижскую академию наук. В 1767 г. он перешел на военно-морскую службу, занимаясь составлением географических карт. Лейтенант в 1775 г., он в 1777 г. был уже генерал-майором, в 1781 г. командовал кораблем «Герье», а в 1782 г. — 74-пу-

шечным кораблем «Солитер». Он крейсировал в районе Мартиники, попал в плен к англичанам, был отпущен на честное слово, служил Республике; по решению Конституанты принял участие в Комиссии по измерению дуги меридиана (при введении метрической системы).

Испанский морской инженер Хорхе Хуан (1713—1773) пришел к такому же, как и Борда, выводу о величине окружной скорости колеса. Но далее задача усложнилась: встал вопрос, считать ли давление воды на лопатки колеса пропорциональным второй степени скорости потока (Ньютон) или первой степени (Борда, Хуан). Математик Шарль Боссю (1730—1814) — академик (1768) и профессор Политехнической школы — из ряда экспериментов вывел, что скорость колеса при оптимальном его действии должна равняться приблизительно $\frac{2}{3}$ скорости потока.

В XVIII в. практики нашли, что кроме приведения колеса в движение путем удара жидкости о его лопатки (нижнебойное колесо) можно использовать и вес жидкости (верхнебойное колесо). Однако инженеры, в частности Белидор, считали, что первый способ выгоднее второго. Интересно, что это мнение было общепринятым и такие грандиозные установки, как гидравлическая система в Марли, близ Парижа, и насосная система возле Лондонского моста, были выполнены по малопродуктивной системе нижнебойных колес. Лишь система Фролова, построенная к тому же под землей, была сооружена по значительно более выгодному верхнебойному принципу.

Ветер как источник энергии стал объектом научного исследования относительно поздно. Первые исследования в этом направлении предпринял Паран, который предположил, что давление ветра пропорционально квадрату его скорости и квадрату синуса угла между направлением ветра и плоскостью лопасти. Величину угла он определил равной $54^{\circ}44'$. Однако ни Паран, ни позже Белидор не приняли во внимание того, что при вращении колеса его действие зависит не от абсолютной скорости потока воздуха, а от относительной и, следовательно, найденный угол не может быть оптимальным. Эту задачу в 1738 г. решил Д. Бернулли. Затем в 1742 г. ею занялся Маклорен, который определил оптимальные элементы крыла. По мнению обоих ученых, оптимальная отдача крыла должна получаться при его равномерном вращении. В начале движения угол между направлением ветра и плоскостями лопа-

⁴⁰ Шарль Югюстен Кулон (Charles Augustin Coulomb, 1736—1806) — французский инженер и физик. Член Парижской академии наук (1781).

⁴¹ Антуан Паран (Antoine Parent, 1666—1716) — французский математик. Член Парижской академии наук (1716). Ученый-универсал. В 1699 г. доказал невозможность вечного движения.

стей равен $54^{\circ}44'$; с ускорением движения он растет и при равномерном движении доходит до некоторой величины. Эйлер считал, что последнюю можно довести до 80° , причем угол остается постоянным по всей длине лопасти. Он нашел также, что в оптимальном случае скорость крыла должна равняться половине произведения скорости ветра на тангенс угла наклона.

В последней четверти века теорией ветряного колеса занимался Кулон, который в результате длительных исследований пришел к следующим выводам.

При обследовании 50 мельниц, расположенных в аналогичных положениях, оказалось, что при скорости ветра 18—20 *фут/сек* они производят одинаковые количества работы, несмотря на различия в конструкции. Очевидно, строители мельниц практически нашли оптимальное расположение всех частей машин.

На практике при любой скорости ветра мельники устанавливают крылья так, что скорость их вращения всегда находится в постоянном отношении со скоростью ветра, что совпадает с результатами, полученными Эйлером. Следовательно, и здесь длительная практика предупредила решения геометров.

Таким образом, оказалось, что по крайней мере в некоторых направлениях механики познания практиков не ниже тех, к которым приходили ученые в результате длительного экспериментирования. Отсюда недалеко и до борьбы; и действительно, на протяжении всего века практики борются против «теории», отказываясь принимать ее решения. Так, например, в 1741 г. в Венеции был опубликован трактат «Законы и феномены, регулирование и использование водяных потоков», автор которого Б. Цендрини писал в предисловии: «Читатель, вероятно, удивится, увидя трактат о воде, переполненным алгебраическими выкладками... Однако если он примет во внимание то, что анализ является основой геометрии, а геометрия — основой учения о воде... он, несомненно, согласится, что не может быть более всеобъемлющего и точного способа, чем тот, которым мы пользуемся в трактате». На протяжении всего века стараются доказать неприменимость математики к решению практических задач. Упрекнули даже Эйлера. Фридрих Великий писал в 1778 г. Вольтеру: «Англичане построили корабли с сечением, которое, по мнению Ньютона, является предпочтительным. Однако их

адмиралы уверяли меня, что эти корабли не смогут так легко ходить под парусами, как те, которые были сооружены по правилам опыта. Я хотел поставить в моем саду фонтан: Эйлер рассчитал производительность колес, которые должны поднимать воду в сборник, для того чтобы она затем была подана по каналам в Сан-Суси, а там в фонтанах поднялась вверх. Моя система была построена по математическим выкладкам и все же она не может поднять ни капли воды на пятьдесят шагов от сборника. Увы и увы! Увы математике!»⁴²

В конце XVIII в. вопросами теории машин занялся выдающийся французский ученый, революционный и военный деятель Лазар Никола Маргерит Карно. Он родился в Нолэ в 1753 г. В 1771 г. он был принят в Мезьерскую инженерную школу, где слушал лекции Монжа. В 1784 г. получил премию за работу о Вобане. Принимал активное участие во Французской буржуазной революции. Во время суда над Людовиком XVI Карно голосовал за его казнь.

В 1793 г. Карно была поручена организация армий Республики и его ввели в состав Комитета общественного спасения. Он принимал участие в разработке всех кампаний революционных войск, входя в детали каждой операции. Его называли «организатором побед французской революции».

В 1794 г. Карно был избран президентом Конвента. Позже он вошел в состав Директории, где получил портфель военного министра. В это время он выдвинул одного из генералов, Бонапарта, которому поручил проведение итальянской кампании. По объявлении империи Карно ушел в частную жизнь, и лишь в 1814 г., когда речь шла о защите границ самой Франции, он сам предложил Наполеону свои услуги и в течение Ста дней был министром внутренних дел. Изгнанный в 1816 г. правительством Людовика XVIII из Франции, Карно переехал в Варшаву, а затем в Магдебург, где и умер в 1823 г.

Научные работы Карно относятся к механике, анализу и геометрии; в них он получил ряд важных результатов. В 1796 г. Карно был избран членом Парижской академии наук. Теорией машин он занимался еще в начале своей научной деятельности: им была написана работа «Опыт о ма-

⁴² Briefwechsel Friedrichs d. Grösse mit Voltaire. Hrsg. von R. Koser, Tl. 3. Leipzig, 1911, S. 427.



Л. Карно

шинах вообще» (1783), которая во втором издании получила наименование «Основные принципы равновесия и движения»⁴³.

Начиная свое исследование с изложения общих принципов механики, Карно приходит к выводу, что основным ее понятием должно быть движение. «Есть два способа раскрытия механики в ее принципах,— говорит он.— Первый — рассматривать ее при помощи теории сил... второй — с помощью теории движения. Первый общепринят, но он основывается на метафизическом и темном понятии силы, он легче, но я избираю

второй, так как хочу свести все к передаче движений»⁴⁴.

Это сочинение Карно является в некоторой степени развитием идей Эйлера и представляет собой первую попытку создания динамики машин. Но Карно не смог разобраться в наметках Эйлера, относившихся к структуре машин, и не решился порвать с общепринятой теорией «простых машин». Зачастую вступая с самим собой в противоречие, он полагает, что всякая машина может быть сведена к рычагу⁴⁵. Однако «простые машины» играют в его концепции лишь вспомогательную роль, так как обойтись без понятия силы он не смог и с их помощью ему легче было показать, что «не только для всех известных машин, но и для всех возможных неизбежным законом является положение: всегда теряют во времени или в скорости то, что выигрывают в силе»⁴⁶. При этом он отмечает, что «одним из самых интересных свойств машин, которое, как мне представляется, еще не было замечено,

заключается в том, что для того, чтобы понудить их произвести наибольшее возможное действие, необходимо... чтобы движение изменялось равномерно»⁴⁷. Как было показано выше, это уже заметил Эйлер.

Для того чтобы перейти к закону движения машины, Карно предварительно уточняет терминологию. В частности, он вводит понятие работы, которое называет «действием мощности» и определяет произведением действующей силы на высоту подъема груза. Значительное место он уделяет исследованию понятия силы инерции. «Количество движения, которое каждое из тел передает другому, когда то изменяет движение первого,— пишет он,— называется силой инерции этого первого. Подобное происходит и тогда, когда дело идет о системе тел. Мы будем называть силой инерции каждого из них в каждое мгновение то сопротивление, коим оно противится изменению своего состояния, т. е. ту реакцию, с которой оно действует на систему других тел, побуждающих его перейти от покоя к движению, от движения к покою или от одного движения к иному движению: иными словами, силу, равную и противоположную той, которую следует приложить к этому подвижному телу, чтобы заставить его перейти из состояния, в котором оно находилось ранее, в состояние, в котором оно окажется через мгновение...

Из изложенного следует, что сила, действующая в каждый момент от каждого из тел системы, является результирующей движущей силы и силы инерции...

«Мне следует заметить,— говорит Эйлер в своем 66-м письме к немецкой принцессе,— что весьма неудачно называть силой это свойство тел, с помощью которого они остаются в первоначальном состоянии: ибо если под словом «сила» понимать все то, что может изменить состояние тел, то это качество, благодаря которому они сохраняют свое состояние, является скорее противоположностью силы. И поэтому лишь по ошибке некоторые авторы дают наименование силы инерции этому свойству: эта ошибка может повлечь за собой грубые неисправности».

Это замечание Эйлера резко, но легко избежать ошибок, различая инерцию и силу инерции. Инерция — это свойство, которое не может входить в расчеты, а сила инерции является настоящим количеством, пригодным для точной

⁴³ L. Carnot. Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement. Paris, 1803.

⁴⁴ Там же, с. XI—XV.

⁴⁵ Там же, с. XIX, 228.

⁴⁶ Там же, с. XX.

⁴⁷ Там же.

оценки. Инерция — это только свойство каждого тела сохранять свое состояние покоя или прямолинейного равномерного движения, а сила инерции — количество движения, передаваемое от этого тела к каждому другому телу, которое будет стремиться вывести его из этого состояния»⁴⁸.

При выводе закона движения машины Карно исходит из следующего положения (Королларий VI): «Предположим, что в некоторой машине приложена система каких-то движущих сил. Обозначим m каждую из масс системы, u — ее скорость, k — начальную скорость, p — ускоряющую силу (ускорение.—А. Б.), когда она возбуждает движение, p^1 — когда она тормозит его, и dt — элемент времени.

Тогда к концу промежутка времени

$$\int dt Smpu \cos \hat{p}u - \int dt Smpu \cos \hat{p}^1u = \frac{1}{2} Smu^2 = \frac{1}{2} Smk^2.$$

Карно указывает, что «машина может быть запущена в ход лишь тогда, когда сумма произведений каждой приложенной к ней силы на соответствующую скорость будет положительной и большей нуля к концу первого периода времени»⁴⁹. Саму машину Карно определяет так: «Машины вообще являются телами, которые помещают между двумя или большим числом мощностей (*puissances*) для переноса действия от одной к другой, в соответствии с поставленной целью»⁵⁰.

Таким образом, Карно был создан трактат, который по праву может считаться первым сочинением по динамике машин в ее истории. Несмотря на свое отвращение к «метафизическому» понятию силы, Карно изучал как раз действие сил в машинах, классифицировал их, выяснил отличие движущих сил от сил сопротивления, исследовал понятие сил инерции, изучил движущие силы и обратил внимание на способы их приложения. Характерным для эпохи и для уровня техники является следующее замечание Карно: «Гражданин Моляр, член Консерватории искусств, изобрел новый, весьма остроумный способ прило-

жения силы человека к машинам, заставляя его попеременно действовать ногами и руками на некую большую рукоятку, движущуюся вперед и назад. Крупным преимуществом этого нового способа является то, что человек при этом сидит, что весьма облегчает его труд и дает возможность использовать на машину ту силу, которую он затратил бы на поддержание себя в стоячем положении»⁵¹. Один из крупнейших деятелей буржуазной революции, Карно выступает в этих словах как яркий представитель своего класса.

Исследуя вопросы сопротивления в машинах, Карно ссылается на работы Кулона и на мемуар Эйлера «О машинах вообще». Вопросами кинематики Карно не занимался. И только позже, в другой работе, он высказался относительно науки о движении и ее связи с общей механикой так: «Мне кажется, что геометрия... сможет охватить движения, которые не сводятся к действию и противодействию тел, ибо механика есть не собственно наука о движении, а наука о сообщении движений. Идея движения так же проста, как идея размерности, и, может быть, они неотделимы друг от друга... Движения, определяемые таким образом, могут быть названы геометрическими движениями, и их определение не относится к механике в собственном смысле; оно является областью геометрии, и я уверен, что для восполнения этой науки следовало бы в ней изучить свойства движений...»

Большие аналитические затруднения, с которыми встречаются в науке о равновесии и движении, происходит в основном потому, что теория геометрических движений еще не создана; все же она заслуживает внимания ученых»⁵².

Вырочем, в 1803 г. Карно уже был знаком не только с идеями Эйлера, но и с наметками Монжа и его учеников в этом направлении.

Араго, автор биографии Карно, одним из наиболее важных достоинств его работы о машинах считает то, что она учит избегать резких перемен в скорости. Араго вспоминает, что сам Карно «политическое устройство общества рассматривал как машину, в которой от крутых перемен теряется много сил, которая мало-помалу расстраивается,

⁴⁸ *L. Carnot. Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*, с. 68—73.

⁴⁹ Там же, с. 199, 201.

⁵⁰ Там же, с. 252.

⁵¹ Там же, с. 258.

⁵² *L. Carnot. Géométrie de position*. Paris, 1803, p. 336.

и, наконец, все ее части выходят из своих мест: тогда надобно вновь собирать или совсем переделывать»⁵³.

На протяжении всего столетия исследования в области теории машин сопровождали работы в направлении изучения трения. Это было совершенно естественным, так как трение как причина, порождающая силы сопротивления в машинах, было замечено уже давно, и борьба с явлением трения началась, вероятно, тогда, когда человек подложил бревно под каменную глыбу для того, чтобы облегчить ее транспортировку. Экспериментальное исследование трения проводилось обычно на установке, в которую входили плоскость и тяжелый куб.

В 1704 г. Антуан Паран определил понятие угла трения, который он назвал углом равновесия. Тангенс этого угла он отождествил с коэффициентом трения. Мухсбрук (Мухенбрек, 1692—1761) заметил, что на величину трения влияет и размер поверхности соприкосновения, а Камю и Десалийер заметили, что трение движения меньше, чем трение покоя. Вопросами теории трения занимались также Лейпольд, Белидор, Эйлер, Карно. Кроме упомянутого выше мемуара Эйлер опубликовал на эту тему два мемуара в «Истории Берлинской королевской академии»⁵⁴. В первой из этих работ он исследует плоское трение и приходит к заключению, что сила трения лежит в плоскости соприкосновения трущихся тел и направлена в сторону, противоположную относительной скорости движения. Он исследует трение на наклонной плоскости и выводит формулу

$$f = \operatorname{tg} \alpha - \frac{2s}{gt^2 \cos \alpha}.$$

где s — путь, пройденный по наклонной плоскости, t — время прохождения пути, α — угол наклона плоскости к горизонту.

Таким образом, исследование Эйлера отличается от работ других ученых динамическим подходом к эксперименту. Он также приходит к выводу, что коэффициент трения движения меньше коэффициента трения покоя.

⁵³ Ф. Араго. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. СПб., 1861, с. 433.

⁵⁴ L. Euler. Sur le frottement des corps solides. — «Histoire de l'Académie Royal à Berlin», 1748 (ed. 1750); Sur la diminution de la résistance du frottement. — Ibidem.

Во втором мемуаре Эйлер исследует силу трения, возникающую при вращении цапфы в подшипнике, и рекомендует пользоваться малыми цапфами.

Эйлером дано классическое решение для трения, возникающего между гибкой нитью и цилиндрической поверхностью⁵⁵, сводящееся к известной формуле

$$T = Q_2 - Q_1 = Q_1(e^{f\alpha} - 1),$$

где Q_1 — нагрузка на нить, Q_2 — действующая сила, α — угол охвата, f — коэффициент трения. До Эйлера этим вопросом занимались Паран и Белидор.

Исследования динамики двигателей, проведенные в XVIII в., заставили обратить внимание и на регулирование хода машин. Несмотря на то что крайняя неравномерность хода машин была замечена еще прежде начала века, а в XVIII в. машина Ньюкомена могла служить образцом такой неравномерности, за что она заслуженно получила наименование «пожирательницы угля», попытки решить эту задачу относятся к середине века.

Первым изобретением, предназначенным для этой цели, явился катаракт, принцип которого был заимствован у водяных часов. Позже был применен маховик.

Происхождение маховика довольно древнее: он применялся на токарных станках с ножным приводом, в конструкции прядильного колеса. При помощи кривошипно-шатунного механизма и маховика возвратно-поступательное движение педали преобразовывалось в непрерывное вращательное движение. Казалось, что маховик было бы нетрудно приспособить к машине Ньюкомена, но этому также мешала ее резкая неравномерность.

Попытки преобразования возвратно-поступательного движения поршня в непрерывное вращательное движение привода ведут свое начало еще от работ Папена. В проекте 1690 г. он пытался получить это преобразование при помощи зубчатой гребенки, связанной со штоком поршня и находящейся в зацеплении с шестерней. Для получения непрерывности вращения Папен предусмотрел в своей машине два цилиндра, работавших попеременно.

В 1698 г. Савари предложил агрегировать свою машину с водяным верхнебойным колесом. В 1736 г. Джонатан

⁵⁵ Novi Commentarii Academiae Petropolitanae, 1775, t. XX, p. 268—342.

Хэлс предложил использовать машину Ньюкомена для ввода и вывода судов из гавани. Установка состояла из машины и колеса с лопатками: движение колесу сообщалось канатом, связанным со штоком поршня и перекинутым через вал колеса; для непрерывности вращения на конце каната крепился груз. Предложение оказалось безрезультатным, что не остановило изобретателей: для преобразования поступательного движения во вращательное предлагались зубчатые передачи и гибкие передачи.

В 1757 г. член Королевского общества Кин Фитцджеральд предложил следующий механизм для преобразования поступательного движения поршня машины Ньюкомена во вращательное: к штоку поршня была присоединена зубчатая гребенка. С помощью зубчатого колеса и другой гребенки движение передавалось на два зубчатых сектора. В результате получалось непрерывное одностороннее вращение секторов. Изобретатель предположил поставить на вал также маховик. Однако большое трение, малая сила поршня и неисправности в действии зубчатого механизма не дали возможности ввести его в практику⁵⁶.

В 1779 г. Мэтью Уозбру, инженер из Бристоля, получил патент на улучшения в конструкции «огневой машины». Для преобразования движений он пользовался храповым механизмом, а на одну ось с храповым колесом насадил маховик. Это было первое применение маховика в практике построения паровых машин, и оно оказалось настолько удовлетворительным, что Уозбру получил заказ на несколько машин такого рода. Однако храповой механизм постоянно выходил из строя, и в 1780 г. на одной из машин Уозбру был поставлен кривошипно-шатунный механизм с маховиком. С этого года маховик уже не покидал паровую машину.

В 1784 г. Уатт построил в Сохо свою первую машину с двумя усовершенствованиями. В ней впервые были применены центробежный регулятор и планетарная передача. Последняя была изобретена им еще в начале 1782 г. При этом Уатт заклинивал маховик не на валу кривошипа, а на втулке зубчатого колеса, свободно надетой на вал кривошипа и благодаря зацеплению с зубчаткой шатуна, вращающейся примерно в два раза быстрее кривошипа.

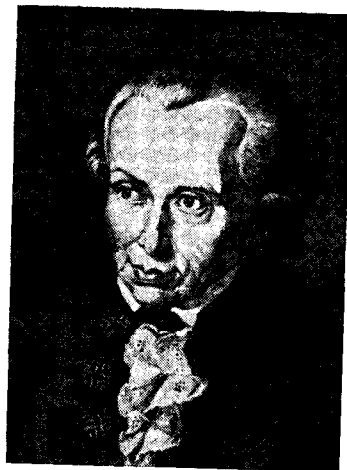
⁵⁶ Н. Божерянов. Описание изобретения и постепенного усовершенствования паровых машин. СПб., 1842, с. 58.

По словам Уатта, «это устройство имеет большое преимущество: давая двойную скорость маховому колесу... оно уменьшает в четыре раза вес обода маховика».

В 1784 г. Уатт сделал еще одно изобретение для преобразования движений, известное под названием «параллелограмма Уатта». Значение этого изобретения для развития общей теории механизмов было огромным, но это обнаружилось лишь в 50-х годах XIX в., после исследований П. Л. Чебышева. Как сказал Уатт: «...Хоть я по особенно забочусь о моей славе, однако горжусь изобретением параллелограмма более чем любым другим моим изобретением». Параллелограмм Уатта известен в двух вариантах: «неполный» и «полный». Создан он был Уаттом после ряда проб, и, вероятно, это изобретение можно считать первым примером экспериментального синтеза механизмов.

В 1786 г. вышла в свет книга Канта⁵⁷ «Метафизические начала естествознания», первая глава которой была посвящена вопросам науки о движении, фономии, по терминологии Канта.

Кант исходит из положения, что основным свойством всего существующего является движение, а поэтому вся наука о природе есть чистое или прикладное учение о движении⁵⁸. Следовательно, фономия является первой,



И. Кант

⁵⁷ Имануил Кант (Immanuel Kant, 1724—1804) — немецкий философ-идеалист. Окончил Кёнигсбергский университет. Преподавал там же. Приват-доцент (1755), профессор (1770). Читал ряд курсов по философии и по естественным наукам, в том числе по математике и физике. Основная черта философии Канта — «примирение материализма с идеализмом» (В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 18, с. 206), приведшее его к субъективному идеализму.

⁵⁸ I. Kant. Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft, Leipzig, 1900, S. 12.— Русский перевод: И. Кант. Сочинения в шести томах, т. 6. М., «Мысль», 1966, с. 66.

вступительной частью метафизических оснований естествознания.

«Поскольку в форономии речь должна идти только о движении, — пишет Кант, — субъекту этого движения, т. е. материи, не приписывается [здесь] никакого другого свойства, кроме *подвижности*. Следовательно, сама материя может пока рассматриваться даже как точка, и в форономии отвлекаются от всех внутренних свойств, стало быть и от величины подвижного, имея дело лишь с движением и тем, что в нем можно рассматривать как величину (со скоростью и с направлением)»⁵⁹.

Таким образом, Кант оставляет за наукой о движении (т. е. кинематикой) лишь вопросы геометрического описания движений, дополняя их понятием скорости как функции времени⁶⁰. Он указывает, что в форономии это понятие применяется исключительно в значении пространственного перемещения.

Большое внимание Кант уделяет и классификации движений, которая возникла, очевидно, вследствие наблюдения движений, происходящих в машинах и их частях. «Движения могут быть, — говорит он, — *вращательные* (без перемены места) или поступательные, а эти в свою очередь — либо расширяющие пространство, либо ограниченные данным пространством. В первом случае это *прямолинейные*, а также *криволинейные, не возвращающиеся к себе движения*. Движения *второго вида* — *возвращающиеся к себе*. Последние в свою очередь либо *циркуляционные*, либо *осциллирующие*, т. е. либо круговые, либо колебательные. Первые проходят то же самое пространство всегда в одном и том же направлении, вторые всегда попеременно в противоположном направлении, подобно качающимся маятникам»⁶¹. Эта классификация не осталась без следа в истории науки: в учении Монжа о преобразовании движений, особенно в первых его набросках, мы обнаружим явное сходство с идеями Канта.

Итак, в результате длительной работы ученых и практиков к концу XVIII в. начала складываться наука о машинах. Как мы видели, в течение этого века было сделано немало, и, ретроспективно оценивая полученные резуль-

таты, мы видим их важное значение для развития науки. Однако самой науки создано не было, и все описанные выше результаты можно найти в третьем томе «Истории математики» Монтюкла; в конце тома помещены и сведения, которые мы сейчас отнесли бы к описательному машиноведению. Таким образом, и теоретическая механика, и прикладные ее вопросы, и многое другое продолжали числиться по «ведомству математики». И это не случайно: прикладные отрасли механики еще не сформировались в науки, да и сама-то аналитическая механика, как с гордостью утверждал Лагранж, благодаря его труду стала частью анализа. В течение XVIII в. очень много думали и писали о машинах, но учение о машинах конца XVIII в. также основывалось на теории «простых машин», как и в начале века, хотя непригодность последней для понимания сущности машин была уже очевидной.

Но для того чтобы наука сделала сильный бросок вперед, понадобилась социальная революция.

⁵⁹ I. Kant. Op. cit., с. 69.

⁶⁰ Там же, с. 75.

⁶¹ Там же, с. 72—73.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ КИНЕМАТИКИ

История науки о машинах и ее выделение в отдельную отрасль знания неразрывно связаны с событиями французской буржуазной революции конца XVIII в. Революция знаменовала переворот не только в области социально-экономических условий жизни общества и его политической структуры. Были подвергнуты переосмыслению вопросы науки и культуры, была создана новая, революционная армия, новые правительственные и муниципальные учреждения, новые школы. С первых же дней своего становления Французская республика занялась подготовкой военных и инженерных кадров. Окруженная со всех сторон вражескими коалициями, находясь под постоянной угрозой внешней и внутренней контрреволюции, Республика должна была в самый короткий срок создать кадры специалистов, которые смогли бы заменить ненадежных или бежавших за границу офицеров и техников «старого порядка».

Из учебных заведений революционного происхождения первой была организована Школа общественных работ. 11 марта 1794 г. был опубликован декрет Конвента, в котором, между прочим, говорилось об организации Комиссии общественных работ. «Эта комиссия займется организацией Центральной школы общественных работ, а также определит экзамены и конкурс для лиц, которые пожелают получить занятие в руководстве этими работами». Центральная школа была открыта 21 декабря 1794 г. В 22 провинциальных городах Франции был проведен конкурс по приему в школу. Вступительные экзамены проводились по арифметике, по основам алгебры и геометрии. В результате в школу был принят 391 ученик.

Курс обучения в Центральной школе общественных работ по первому учебному плану состоял из двух циклов: математических и физических наук. Первый цикл включал

анализ с приложениями к геометрии и механике и начертательную геометрию; последняя в свою очередь подразделялась на чистую начертательную геометрию, учение об архитектуре и фортификацию. К геометрии относилось и черчение. Цикл физических наук состоял из физики и химии. Впервые в план обучения включено было выполнение лабораторных работ в специальных помещениях; чертежные работы выполнялись также в специальных залах. Продолжительность обучения в школе по первому учебному плану была установлена в три года, при занятиях по десять часов в день. Так как первый набор в школу был крайне неоднородным и уровень знаний учащихся был неодинаковым, то по ряду предметов организовались пропедевтические курсы. Каждый из профессоров, читавших эти курсы, представлял для предварительного рассмотрения план-схему излагаемого им предмета. Один из этих планов и лег в основу программы курса построения машин. Одновременно с организацией школы были подготовлены учебно-наглядные пособия и таблицы.

Центральная школа общественных работ просуществовала недолго. Уже 15 фруктидора III года (1 сентября 1795 г.) она была переименована в Политехническую школу, получив таким образом название, которое сохранилось и поныне до настоящего времени. Затем 30 вандемьера IV года (22 октября 1795 г.) была установлена связь Политехнической школы с отраслевыми техническими училищами: артиллерийской, инженерной и горной школами, а также со школой мостов и дорог, в связи с чем продолжительность обучения в школе была сокращена до двух лет. Обучение охотно, пользуясь современной терминологией, общетехнический цикл; затем выпускники Политехнической школы поступали в одну из отраслевых школ, также с двухлетним сроком обучения, где и приобретали специализацию. При Политехнической школе был образован Совет усовершенствования (Conseil de Perfectionnement), в задачи которого входили рассмотрение и утверждение учебных материалов школы.

Политехническая школа, основанная в дни революции, имела славные революционные традиции, на которые власти после термидорианского переворота стали смотреть косо. Сложка за учащимися и стремление «опекаль» их в течение всех двадцати четырех часов усилились после прихода к власти Наполеона. Администрации Политехниче-

ской школы было приказано смотреть за поведением студентов, «чтобы, предоставленная сама себе, молодежь не бегала в центр Парижа и не производила там беспорядков». Администрация школы обратилась к семьям студентов и к содержателям пансионов с просьбой о содействии, но и эта мера оказалась недостаточной. Тогда императорским декретом от 16 июля 1804 г. в Политехнической школе был введен казарменный режим, и она была преобразована в закрытое учебное заведение военного типа. Монж пять раз обращался к Наполеону с просьбой об отмене этого указа, но безрезультатно.

В 1805 г. решением совета школы учебные программы еще раз были изменены. При этом был установлен точный объем знаний по каждому предмету, а также продолжительность курсов. Этим решением, в частности, к курсу начертательной геометрии добавлялся раздел, посвященный элементам машин. Правда, это решение было выполнено лишь тремя годами позднее — в 1808 г. Связано было это решение, равно как и вся история Политехнической школы в процессе ее становления, с именем Гаспара Монжа.

Гаспар Монж (Gaspard Monge) родился 9 мая 1746 г. в семье мелкого торговца, происходившего из крестьян, в Боне. У него были два брата — Луи и Жан¹. Первоначальное образование Монж получил в Боне, в коллеже ораторианцев, по окончании которого был переведен в ораторианский же коллеж в Лион. Это было в 1762 г., и уже в следующем году он сам начал преподавать физику в том же коллеже. Таким образом, в 1763 г. началась карьера Монжа как преподавателя и ученого. А всего преподавал он 48 лет. Ораторианцы (монашеский орден) настаивали, чтобы он принял монашество и остался в коллеже, однако он отказался, решив продолжить свою учебу.

Благодаря приобретенным познаниям в геометрии и топографии Монж смог поступить в Мезьерскую военную инженерную школу на отделение кондукторов фортифика-

¹ Луи Монж (1748—1827) — профессор Парижской военной школы, затем ассистировал своему брату в Мезьере. Экзаменатор школы гидрографов, морской школы, Политехнической школы.

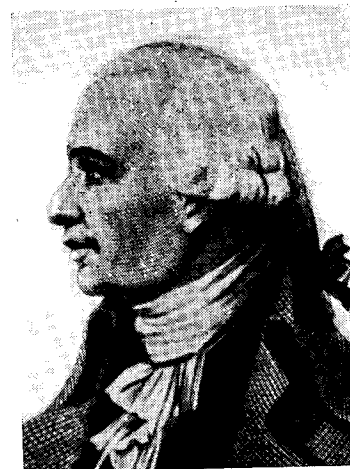
Жан Монж (1751—1813) — профессор военной школы, консул Франции в Ла Корунье, профессор гидрографии в Нанте и в Анвере. См.: R. Taton. L'oeuvre scientifique de Monge. Paris, 1951, p. 9.

ционных работ. Одновременно он выполнял обязанности чертежника, а позднее и младшего преподавателя школы. Не следует забывать, что Монж учился при «старом порядке» и он, выходец из низов, несмотря на свою одаренность, не мог продвигаться на военной службе и получить чин офицера.

Уже в первые годы пребывания в Мезьерской школе Монж начал работать над созданием начертательной геометрии. Однако опубликовать свои исследования он не мог вплоть до революции: из-за соперничества, существовавшего тогда между отдельными военными школами, каждая засекречивала свои методы и учебные приемы, дававшие ей в какой-то мере преимущество перед другими школами. Поэтому работы Монжа по начертательной геометрии были опубликованы значительно позже.

В Мезьерской школе Монж начал интересоваться машинами. На уроках начертательной геометрии он предлагал ученикам для составления и изучения схемы отдельных машин. При этом им была высказана мысль, что промышленное развитие страны и улучшение условий человеческого существования возможны только в результате развития машин, которые смогли бы заменить тяжелый труд людей. Утопичность этой идеи в период перехода буржуазии к власти совершенно ясна, однако она в какой-то степени поясняет направленность интересов Монжа.

Исследовательская деятельность Монжа довольно скоро привлекла внимание: в 1768 г. он получил кафедру профессора в Мезьерской школе, в 1772 г. был избран корреспондентом, а в 1780 г. — академиком Парижской академии наук. В 1783 г., после смерти математика Безу, он был назначен на место последнего экзаменатором флота и в связи с этим ему пришлось уйти из Мезьерской инженерной школы, где он провел двадцать плодотворных лет.



Г. Монж

С 1780 г. Монж работал над составлением учебника механики для кадетов, который и вышел в свет в 1786 г. Четвертая часть этого учебника посвящена была машинам.

«Машиной называется,— писал Монж,— любое приспособление, предназначенное для переноса действия некоторой определенной силы в точку, не находящуюся на направлении силы, так что эта сила может передвинуть тело, к которому она приложена. При этом движение происходит по направлению, отличному от направления силы»². Здесь Монж придерживается еще старого, общепризнанного учения, согласно которому основное назначение машины — это подъем или перемещение тяжестей. Однако в книге намечена и новая мысль, впоследствии развитая Монжем,— мысль о машине как о приспособлении, служащем для преобразования движений. Во множестве разнообразных форм машин различного назначения Монж начал искать то единство, которое могло бы облегчить понимание машин вообще и свести их построение к определенной схеме, не зависящей ни от формы конкретной машины, ни от ее назначения. Соответствующая идея и была им найдена в принципе передачи и преобразования движений.

Генезис этой мысли можно проследить на протяжении всего столетия. Как уж заметил Карно, машина является связующим элементом для двух понятий — силы и движения. Но идея преобразования сил лежала в основе статики «простых машин». Кроме того, она была ясна для подъемных машин и для других приспособлений, задачей которых было перемещение грузов; в текстильных машинах, в металлургических и деревообрабатывающих станках, не говоря уже о часах, роль ее была значительно менее очевидной. С другой стороны, ни скорости, ни ускорения не играли еще особой роли при построении и эксплуатации машин, а следовательно, при вдумчивом изучении машин Монж и должен был прийти к идее преобразования движений, т. е. получения на ведомом органе машины движения, отличного по своему виду³ от того, которое двигатель придает ведущему звену машины — приемнику. Впрочем, эту идею Монж мог заимствовать и у своих предшественников: мы видели

выше, что она была достаточно ясно выражена у Лейбница. И, наконец, на протяжении всего столетия периодически (Даламбер, Карно) возникает мысль о построении механики, исключив из нее метафизическое и неясное понятие силы.

Однако в принципе преобразования движений, выдвинутом Монжем, содержались в сущности не одна, а две мысли и, очевидно, большее значение имела не идея машины как органа или совокупность органов для преобразования движений, а мысль о разложении машины на ее элементарные составляющие — на механизмы, задачей которых и является преобразование движений. Это рабочее предположение Монжа, представляющее машину как совокупность некоторых взаимосвязанных устройств (по современной терминологии — механизмов) или элементарных машин (по терминологии Монжа), не имеющих ничего общего с «простыми машинами», и дало основной толчок к созданию науки о машинах. К сожалению, самому ученому не удалось полностью развить свои идеи.

Монж принимал активное участие во французской буржуазной революции 1789 г. Он был членом якобинского клуба, некоторое время занимал должность морского министра. Оставив эту должность, он отдался научным работам, проведение которых было важно для обороны страны. Монж занимается поисками селитры, необходимейшей для производства пороха, изготовлением пороха, конструирует машины для этого же производства, занимается литейным делом. Днем он управляет производством, а ночью пишет руководство для рабочих по изготовлению орудий.

Большая заслуга Монжа и в деле перестройки системы технического образования. Основная его педагогическая идея заключалась в том, чтобы сделать знания доступными для самых широких народных масс, а для этого почти всю образовательную систему надо было строить заново: старый школа в самом своем принципе была сословной, и эту ее характерную особенность испытал на себе и Монж. Кроме того, надо было изменить методику преподавания, сделать ее проще и доходчивее.

3 января III года (24 сентября 1794 г.) химик Фуркриен прочел в Конвенте доклад об организации Политехнической школы. К этому докладу было приложено соображение Монжа, уточняющее ее цели и направление учебной работы. Монж указал, в частности, что в курсе первого

² G. Monge. *Traité élémentaire de statique à l'usage des colleges de la marine...* Paris, 1786, p. 123—124.

³ См. выше (стр. 96) классификацию движений у Канта.

года обучения следует выделить два месяца на изучение элементов машин, применяемых на общественных работах. «Мы понимаем,— писал он,— под элементами машин приспособления, с помощью которых можно получить из движений одного вида движения иного вида, преобразуя таким способом движение по прямой, вращательное и возвратно-поступательное движения. Ясно, что самые сложные машины являются только результатом комбинаций некоторых из этих первичных приспособлений, а следовательно, надо лишь позаботиться о том, чтобы перечисление последних было полным»⁴. Из дальнейшего следует, что Монж предполагал ввести курс построения машин в качестве неотъемлемой части курса начертательной геометрии, причем и в этом последнем он обращает особенное внимание на его прикладное значение. Во введении к курсу начертательной геометрии, читанному им в Нормальной школе⁵ в 1794—1795 гг., он указывает, что особенно важным назначением начертательной геометрии является изображение и определение элементов машин, «при помощи которых человек, используя силы природы, не занимается, если можно так выразиться, в своих действиях иной работой, кроме работы своего ума»⁶.

Как уже упоминалось, каждый профессор Политехнической школы составлял план-схему пропедевтического курса по своему предмету. Эти планы были затем изданы; Монж в своем плане отводил четыре последних занятия на изучение машин. В план входили:

«1. Изображение приспособлений, при помощи которых можно преобразовать поступательное движение в движение по кругу и, наоборот, движение по кругу в движение возвратно-качательное и, наоборот, возвратное движение в движение поступательное, и наоборот.

2. Изображение приспособлений, применяемых для выполнения всех видов движений.

3 и 4. Описание основных машин, приводимых в движение с помощью силы человека, силы животных, а также сил

природы, например текущей или падающей воды, ветра или водяного пара».

В «Журнале Политехнической школы» Монж развивает свою мысль: «...одним из самых полезных применений начертательной геометрии, поскольку она знакомит с результатами стереометрии, а также сообщает детальные сведения об объектах, необходимых почти для всех искусств, является действительное описание форм и конструкций элементарных частей машин». И далее: «Силы природы, имеющиеся в распоряжении человека, определяются тремя различными элементами — массой, скоростью и направлением движения. Лишь изредка эти три элемента, о которых идет речь, имеют качества, необходимые для выполнения заданной цели; поэтому машины и имеют основным своим назначением преобразование имеющихся в распоряжении сил в иные силы, которые смогли бы выполнить необходимую работу. Всякая машина состоит из ряда элементарных частей, причем каждая имеет свою частную задачу, которую можно выполнить, в зависимости от обстоятельств, различным способом. Полное перечисление всех способов изменения сил и описание различных вариантов, с помощью которых можно получить одинаковые изменения сил при разных обстоятельствах, обеспечит техникам (*aux artistes*) наилучшие возможности при выполнении соответствующих работ»⁷.

Если отвлечься от некоторой терминологической путаницы, характерной в общем для всего столетия, то идеи Монжа оказываются выраженными в совершенно ясной форме. Старая теория «простых машин» преодолена, доказывать ее ненаучность в применении к машине даже не следует: никто из техников конца XVIII в. и не предположит, что машины действительно состоят из «простых машин». Но методика исследования у Монжа остается прежней: он лишь ставит вместо статических элементов — «простых машин», преобразующих силы, элементы кинематические, преобразующие движения, и ищет те «элементарные машины» (он не пользуется термином «простые машины» ввиду его специфического значения, а термина «механизмы» еще нет), из которых опять-таки состоят все «сложные» машины. Нечеткость определения является существ-

⁴ Цит. по кн.: *Lanz et Bethencourt. Essai sur la composition des machines*. Paris, 1808, p. V.

⁵ Нормальная школа (*Grande Ecole Normale de Paris*) была основана Конвентом в 1794 г. для преподавания гуманитарных и естественных наук. Цель обучения — дать учащимся основы высшего образования, не готовя их к определенной деятельности.

⁶ *G. Monge. La géométrie descriptive*. 3 ed. Paris, 1811, p. IX.

⁷ *Ch. Dupin. Discours... prononcé aux funérailles de M. Hachette*. Paris, 1834, p. 9—10.

венным недостатком как Монжа, так и его ближайших последователей и учеников; они не смогли выделить искомые элементы из всего многообразия известных им машин, хотя и произвели при этом огромную, до настоящего времени недостаточно оцененную работу. Однако они не ограничили искомые элементы некоторыми, наперед заданными условиями и не выработали критерия, необходимого для этого. А посему в «элементарные машины» попали и механизмы, и группы механизмов, и отдельные детали, и, наконец, целые машины, которые уже никак нельзя было бы считать элементарными составляющими машин.

Но в цитированном отрывке есть еще одна идея Монжа: это неявно сформулированная задача синтеза (облегчение труда конструктора как конечная цель исследования). Идея эта была гениальной догадкой, взглядом в будущее, не осуществимым в то время из-за отсутствия научной базы. Ближайшие преемники Монжа отступились от этой задачи как от дела трудновыполнимого и даже перестали о ней вспоминать, за исключением, быть может, Бетанкура, который, как практический инженер, использовал ее при построении своего курса.

Монж не имел возможности воплотить свои идеи в жизнь. Ему пришлось помимо науки заниматься еще многим другим — принимать художественные ценности в Италии (во время итальянской кампании Наполеона), сопровождать Наполеона во время египетской кампании; хотя в последнем случае он вместе с Бертелло и другими учеными должен был во время кампании заниматься научными изысканиями.

10 августа 1798 г. по решению Бонапарта в Каире была организована египетская академия наук — Египетский институт, президентом которого был назначен Монж. Несмотря на чрезвычайно короткое существование института, работавшие в нем ученые достигли многого: так, например, была открыта полузабытая культура Египта.

Монж тоже воспользовался своим пребыванием в Египте: в частности, он осмотрел трассу древнего канала через Суэцкий перешеек.

По возвращении во Францию в конце 1799 г. Монж отказался от руководства Политехнической школой, оставив за собой лишь лекции. В эти годы он публикует в трудах Политехнической школы серию мемуаров по различным вопросам геометрии.

Но уже во время пребывания Монжа в Египте его ученик Ашетт начал развивать его мысли относительно теории машин. Ашетт не был одинок: над тем же вопросом работали и два испанских ученых — инженер Бетанкур и математик Ланц. Как выразился Дюпен — один из ближайших сотрудников Монжа по Политехнической школе и по Французскому институту, «Монж с превосходством гения в строках элементарной программы наметил для описания машин порядок, который оказался простым, ясным и величественным. Это была программа курса, читаемого Ашеттом в Политехнической школе. Позже она была разработана, с одной стороны, Ланцем и Бетанкуром, а с другой — Ашеттом». Переворот в науке о машинах, связанный с именем Монжа и его последователей, произвел на современников большое впечатление.

Монж был не только выдающимся ученым, но и очень крупным преподавателем — два качества, которые не так часто совмещаются в одном лице. Араго писал, что «Монж всегда старался быть ясным, чтобы его мог понять самый медлительный ум, и он всегда добивался этой цели». И хотя речь Монжа не была легкой, его ученики считали, что «другие говорят лучше, но никто не преподает так хорошо». Ясность и отчетливость свойственны всем лекциям Монжа, записанным им самим или его учениками.

Из-за множества разнообразных занятий у Монжа оставалось все меньше времени для научного творчества. В 1803 г. он был назначен вице-президентом сената, а в мае 1806 г. — его президентом. Ему приходится большую часть времени проводить вне Парижа. После Ста дней, когда Монж примкнул к Наполеону, он становится «нежелательным лицом». В 1816 г. его исключили из числа членов Академии наук. 28 июля 1818 г. Монж скончался; гроб его сопровождали друзья и сотрудники. Ученикам Политехнической школы участие в похоронах было запрещено. Но в первый же свободный день они возложили на могилу основателя Политехнической школы цветы.

В то время, когда Монжу приходилось находиться за пределами Франции, его кафедра в Политехнической школе поручалась Ашетту. Монж дал ему ряд указаний о подготовке курса построения машин, но из-за крайней загруженности Ашетта дело с постановкой преподавания этого нового предмета затянулось. Только в декабре 1805 г. совет Политехнической школы вспомнил об этом курсе в

связи с объединением ряда специальных предметов в один курс строительства и машин. Это было первой пробой создания прикладной механики.

Лишь через год, в декабре 1806 г., Ашетт получил официальное предложение подготовить курс построения машин. Он подготовил и представил совету школы проект программы нового курса, основные положения которой были следующими.

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 получаются круговое и прямолинейное возвратные движения.

3. Обозначая R — прямолинейное непрерывное движение, r — прямолинейное возвратное движение, C — круговое непрерывное движение, c — круговое возвратное движение (качение), получаем десять комбинаций из четырех букв: $RR, Rr, RC, Rc, Cr, CC, rc, cc, rr, Cc$, соответственно которым рассматриваются десять элементарных преобразований движений.

Текст программы, составленной Ашеттом, представляет большой интерес не только как первый документ по теории механизмов и машин, но и как первая программа по группе предметов цикла науки о машинах. Действительно, в XVIII в. ни в одной технической школе не преподавался курс машин. Только при изложении некоторых специальных предметов — архитектуры, горного искусства, гидротехники — приводились описательные сведения о машинах, применяемых в соответствующих производствах. Таким образом, от программы Ашетта 1808 г. ведет свою родословную не только теория механизмов и машин, являющаяся непосредственным правопреемником курса построения машин, но и отпочковавшиеся от него позже курсы машиноведения, деталей машин и пр.

Приводим текст программы Ашетта.

«Программа элементарного курса машин, являющегося частью курса начертательной геометрии Политехнической школы.

О силах, применяемых для движения машин и о способах их определения. Силы, получаемые от животных, от воды, ветра и от сгораемых субстанций.

Об элементарных машинах, о круговом движении, о движении прямолинейном, о движении возвратном (*va et vient* — туда и обратно); 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 серий.

Объяснение основных машин, применяемых на строительстве.

Приложение теории теней и раскраски к черчению машин.

Работа, требуемая от учащихся:

Учащиеся должны начертить в туши, с раскраской:

1. Толкатели, приводимые кулачками.
2. Винт с треугольной и прямоугольной нарезками.
3. Цилиндрическое зубчатое или червячное зацепление.

Они должны пояснить эпюры следующих машин:

1. Коническое зацепление.
2. Всасывающий и нагнетающий насосы.
3. Нория прямая и наклонная.
4. Водоподъемная машина.
5. Конный привод.
6. Архимедов винт.
7. Крыло ветряной мельницы.
8. Огнедействующая машина.
9. Машина для забивки свай.
10. Землечерпалка»⁸.

К программе была приложена таблица элементарных машин, состоявшая из десяти рядов, разделенных поперечными колонками. В клетках, образованных пересечением рядов и колонок, схематически изображены были элементарные машины, ряд клеток остался незаполненным. Из-за неясности понятия элементарной машины в число последних попали и механизмы, и машины большей или меньшей сложности.

⁸ Цит. по кн.: *Lanz et Bethencourt. Essai sur la composition des machines*, p. 4.

Одновременно с Ашеттом два испанских ученых, инженер А. Бетанкур и математик Х. М. Ланц, представили совету Политехнической школы свою книгу, написанную по программе Монжа и названную «Курсом построения машин». 12 августа 1808 г. совет заслушал сообщения Ашетта и рассмотрел представленные ему книгу и таблицу, составленные Ланцем и Бетанкуром, программу и таблицу, составленные Ашеттом, а также статью Ашетта, излагающую историю вопроса; после этого совет предложил начальнику Политехнической школы издать все эти материалы в одной книге в качестве учебника. Книга и была издана в том же году.

Первый из авторов «Курса», которому, по-видимому, пришлось заниматься его изданием, Хосе Мария Ланц (José-Maria Lanz), родился в Мексике в середине XVIII в. В десятилетнем возрасте переехал в Испанию, но потерял там родителей и через некоторое время попал во Францию, где был усыновлен одной семьей, давшей ему средства для образования. Учился в Сорбонне, где в основном занимался математикой и естественными науками. По возвращении в Испанию занимался исправлением карты Испании и преподавал в нескольких школах математику, а по организации в Мадриде школы мостов и дорог (которой руководил Бетанкур) получил там кафедру математики. В годы французской оккупации сотрудничал с французами, вместе с ними выехал во Францию и, по-видимому, преподавал в Политехнической школе, а затем, после падения империи, переехал в Англию.

В середине второго десятилетия XIX в. Ланц переехал в Аргентину, был директором Математической академии в Буэнос-Айресе, затем вернулся в Париж и работал там руководителем механической части часовой фабрики. Дата смерти не известна.

Второй из авторов книги, Агостино де Бетанкур-и-Молина, или, как его звали в России, Августин Августинович Бетанкур, родился 2 февраля 1758 г. на о-ве Тенерифе (Канарские острова). Учился в Мадриде, в Королевском учебном заведении св. Исидора, где изучал математику, математический анализ, аналитическую механику и физику; одновременно он изучал архитектуру и рисование в Академии изящных искусств. С 1780 г. Бетанкур работал в министерстве Индии; в 1784 г. был командирован во Францию, где ознакомился с идеями Монжа. К этому вре-

мени относятся его работы над теорией паровой машины и над практикой построения ее. В 1788 г. он ездил в Лондон, где осмотрел машины Уатта, и в 1790 г. предложил свою конструкцию паровой машины.

В 1791 г. Бетанкур вернулся в Испанию; здесь он руководит Королевским кабинетом машин, строит оптический телеграф, занимается проектированием машин и приспособлений. С 1793 по 1797 г. он работает в Англии и во Франции, коллекционирует чертежи и приборы, которые впоследствии перевозит в Испанию. В 1801 г. его назначают генеральным инспектором путей сообщения, и он начинает заниматься строительством каналов. Одним из первых его мероприятий была организация школы инженеров дорог, каналов и мостов. Не позже 1803 г. он начинает вместе с Ланцом работать над учебником по курсу построения машин.

Школа просуществовала недолго: 2 мая 1808 г. она была разрушена огнем французской артиллерии; при этом погибла значительная часть коллекций Королевского кабинета машин, собранных Бетанкуром. Еще до этого, в апреле 1707 г., он переехал во Францию и через некоторое время начал хлопоты о переходе на русскую военную службу. 30 ноября 1808 г. он был принят на службу в чине генерал-майора и направлен в ведомство путей сообщения. Уже в следующем году он был произведен в генерал-лейтенанты и назначен инспектором создаваемого института «водяных и сухопутных сообщений». Проект организации института был составлен Бетанкуром.

Экономика России в первой четверти XIX в. характеризуется быстрым ростом промышленности. Внутренний рынок выдвигал перед промышленностью все новые требования: начали возникать машиностроительные заводы, текстильные фабрики. Большое количество текстильных,



А. Бетанкур

металлических и других изделий необходимо было для снабжения армии, а ввоз извне в связи с задуманной и проводимой Наполеоном континентальной блокадой сократился. Это обстоятельство в свою очередь вызвало необходимость технического перевооружения промышленности. Наряду с мануфактурой, занимавшей господствующее положение в промышленности, возникает фабрично-заводское производство: начинается промышленный переворот. Особое значение получает строительство каналов и дорог: необходимо было совершенствовать пути сообщения и для улучшения снабжения страны (прежде всего обеих столиц) и в военных целях. Поэтому организация института путей сообщения была весьма важным и очень быстро оправдавшим себя мероприятием.

Организация высшей технической школы была тем более необходима, что развитие высшего образования в России отнюдь не соответствовало потребностям страны в кадрах. Первый русский университет — Московский — был открыт по плану М. В. Ломоносова в 1755 г.; следующий за ним — Казанский — только в 1804 г. В 1805 г. был открыт Харьковский университет, а в 1819 г. — Петербургский. Кроме этого, в Петербурге был Горный институт, некоторое время в начале века работало Училище корабельной архитектуры и три военных училища, скорее средних, чем высших. И это было все. Институт корпуса путей сообщения явился первым в России высшим техническим учебным заведением, созданным на новых основаниях и по новым планам: при составлении последних Бетанкур использовал как опыт Политехнической школы и специальных школ, так и Мадридской путевой школы.

На втором году существования института, 16 ноября 1811 г., Бетанкур представил проект его реорганизации под названием «Распределение курсов учения в Институте путей сообщения». «Он указывал, между прочим, что «цель института — снабдить Россию инженерами, которые прямо по выходе из него могли бы быть назначаемы к производству всяких работ в империи. Следовательно, необходимо, чтобы при самом выходе из института воспитанники его были знакомы с основными началами наук и практическими их приложениями к инженерному искусству, а потому последний год пребывания в институте они должны посвятить исключительно практике, а до того времени познакомиться со всеми необходимыми для того науками».



Институт инженеров путей сообщения

Введение практики было новостью не только для России: практикой пренебрегали в большинстве западноевропейских технических школ.

Далее в проекте следует распределение предметов по бригадам (курсам) — от четвертой (начальной) до первой. Приложение механики к устойчивости зданий и к машинам Бетанкур относит к учебному плану первой бригады. Этот предмет впервые был введен в институте в 1811 г., т. е. на три года позже, чем в Политехнической школе, и раньше, чем во всех других технических школах. Первым учебником был тот же «Курс» Ланца и Бетанкура.

Чистую и прикладную математику в институте первое время читал В. И. Висковатов, а после его смерти (1812) Бетанкур пригласил Д. С. Чижова, который приступил к чтению лекций по математике и механике. Одновременно в институт был откомандирован подполковник А. И. Майоров, которому было поручено чтение курсов механики, приложения алгебры к геометрии, приложения анализа к геометрии, дифференциального и интегрального исчисления, аналитической статики и «способы исчислять действие машин, трение и жесткость канатов». Летом 1813 г. место Майорова занял академик С. Е. Гурьев.

Во время Отечественной войны 12-го года институт оправдал себя: офицеры-путейцы работали в действующей армии; в армию была направлена четверть всего состава института (33 человека из 133). Воспитанники института принимали участие во многих операциях действующей армии, в частности и в Бородинском сражении. Только с 21 августа по 24 ноября 1812 г. отряды корпуса путей сообщения исправили более 1000 верст дорог и построили 178 мостов. По словам фельдмаршала М. И. Кутузова, армия от недостатка путей сообщения не страдала.

В 1820 г. в курс прикладной механики, читаемый в институте, внесены были еще некоторые дополнения: статьи о вычислении действия машин, о паровых и вододействующих машинах и ветряных мельницах. В том же году Бетанкур пригласил на должности профессоров двух бывших учеников Политехнической школы. Гаврила Францев Лямэ, как именовали его в русских документах, поступил на кафедру механики, математики и физики, а Эмилий Клавдиев Клапейрон занял кафедру прикладной механики и химии. Оба они (позднее академики) преподавали в институте до 1830 г. Не лишено интереса их мнение о постановке преподавания в институте. А. С. Ершов пишет: «Бывшие профессора Института путей сообщения Лямэ и Клапейрон, заслужившие европейскую известность, часто выражали мнение, что русские отличались большими успехами в прикладных науках и практических занятиях. Большая часть из воспитанников института достигли в искусстве черчения такого совершенства, до которого едва ли могли возвыситься ученики Политехнической школы»⁹.

В те годы начертательная геометрия Монжа, почти до самой революции являвшаяся «производственным секретом» Мезьерской инженерной школы, была важнейшим предметом технического образования. В самой Политехнической школе кафедра начертательной геометрии была одной из основных.

Институту и совершенствованию в нем преподавания Бетанкур уделял много времени и внимания. Однако в 1818 г. он был назначен главным директором путей сообщения России. Кроме того, с 1816 г. под его руководством

начал работать комитет по руководству строительством Петербурга. В эти годы энергия Бетанкура неистощима. Он занимается очисткой и расширением Кронштадтского порта, для которого сконструировал и построил многоковшовый экскаватор, занимается преобразованием Тульского оружейного завода, для которого сконструировал ряд машин, проектирует пушечный завод в Казани, проектирует Московский экзерциргауз (Манеж) и деревянные фермы перекрытия для него, самые большие в Европе, организует Экспедицию заготовления государственных бумаг, для которой проектирует основные машины. Кстати, рисунок ассигнаций 1818 г. тоже был выполнен Бетанкуром.

В 1812 г. по проекту и под надзором Бетанкура был построен первый в России постоянный большой мост — деревянный семиарочный Каменноостровский мост в Петербурге, а также мосты в Ижоре, Петергофе и Туле. Он руководил строительными работами при сооружении фундаментов Исаакиевского собора в Петербурге и переносом Макарьевской ярмарки в Нижний Новгород. Есть сведения, что Бетанкур работал и над проектом сооружения в России железных дорог.

Занимался он и вопросами технического образования: в 1820 г. по его проекту были учреждены училища для подготовки среднего технического персонала: военностроительная школа и школа кондукторов путей сообщения в Петербурге.

Однако своей деятельностью Бетанкур нажил себе много врагов, и 2 августа 1822 г. «властитель хитрый и лукавый», Александр I, отстранил Бетанкура от обязанностей главного директора путей сообщения и передал этот пост своему дяде, герцогу Вюртембергскому, человеку в технике «свежему», пользуясь выражением М. Е. Салтыкова-Щедрина. За ним был оставлен лишь институт, Петербургский строительный комитет, Исаакиевский собор и Нижегородская ярмарка.

Однако тучи собирались и над институтом. Крайний обскурантизм объединенных сил Аракчеева и Магницкого тяжело отразился на не успевших еще укрепить русских высших школах. Влияние первого выразилось в введении казарменной муштры, а второй начал преобразовывать преподавание в духе самого скверного ханжества. «Две линии, — говорил ректор Казанского университета Николь-

⁹ А. С. Ершов. О высшем техническом образовании в Западной Европе. М., 1857.

ский, — крестообразно пересекающиеся под прямым углом, могут быть прекраснейшим иероглифом любви и правосудия. Гипотенуза в прямоугольном треугольнике есть символ сретения правды и мира, правосудия и любви». Вот один из примеров «математики» в духе Магницкого и его присных!

Больше всех досталось Казанскому университету, где неправый суд творил сам Магницкий. На заданный ему, как попечителю учебного округа, министерством вопрос «об исправлении Казанского университета, если исправить его можно, или в противном случае о замене его другим родом учебного управления» Магницкий ответил, что «по-неже нет никакой возможности исправить такое сословие, где из двадцати пяти человек едва треть благонадежных выбрать можно: 1) Казанский университет подлежит уничтожению, 2) уничтожение сие может быть двух родов: а) в виде приостановления, б) в виде публичного его разрушения. Я бы предпочел сие последнее...»¹⁰ Подобное же творилось в Петербургском и Харьковском университетах; в июне 1822 г. было опубликовано распоряжение не принимать в Дерптский университет студентов, ранее учившихся за границей, «которые ежели когда и не вредны со стороны политических их идей и рассуждений, то большей частью однако ж имеют всегда пагубное влияние на порядок в университете, привозя с собой и распространяя в оном своевольные обычаи иностранных университетов».

Не избегал общей участи и Институт корпуса инженеров путей сообщения: в начале 1824 г. он был преобразован в закрытое военно-учебное заведение. 4 февраля того же года Бетанкур был уволен от дел по прошению, а 14 июля жизнь «воспитателя русских инженеров», «отличнейшего человека, умного и ученого до чрезвычайности, доброго и благородного» окончилась.

Научное и педагогическое творчество Бетанкура развивалось в очень широком диапазоне; как инженер он был и механиком, и строителем, и технологом, и путейцем. Кроме того, он был архитектором и художником-графиком. Здесь нас будет интересовать лишь одна сторона его деятельности: труды в области кинематики механизмов.

¹⁰ Цит. по кн.: Е. К. Шмидт. История средних учебных заведений в России. СПб., 1878, с. 144—145.

Следуя идеям Монжа, Ланц и Бетанкур основывают свое структурное исследование на отборе и соответствующей классификации элементарных машин. Они составляют таблицу этих элементарных машин, основной задачей которой является наведение порядка во все увеличивающемся количестве и многообразии машин. Кроме того, таблицы являлись подсобным материалом для конструкторов, при создании ими новых машин и, таким образом, стали первым документом совершенно нового направления в машиностроении — синтеза машин и механизмов.

В книге шла речь и о формообразовании машин. Форма любой машины является таким же необходимым ее атрибутом, как и ее кинематическая и динамическая сущность. Это относится не к «украшательству», не к «внешней» форме машины, а к той форме, которая отображает ее сущность.

Исторически создание формы новых машин было обусловлено подражанием формам старых машин, формам животного мира, и лишь изредка инженеры-художники предлагают новые формы; таковых много, например, у Рамелли. Постепенно возникает понятие механизма; у Кардано, у Леонардо да Винчи, у Лейбница это понятие приобретает уже весьма ясную кинематическую окраску.

Положение изменилось в XVIII в., когда «изящные искусства» отделились от прочих «искусств». Было уточнено определение профессий — «artiste» (художник) и «artisan» (ремесленник); творцы машин отделились от создателей художественных ценностей.

Но форма машины, хотя и не признанная наукой, начала играть определенную роль в техническом творчестве. Интересная работа в этом направлении была выполнена Бетанкуром при воссоздании им паровой машины двойного действия. При осмотре машины Уатта, установленной в Лондоне на мельницах у моста Черного монаха, Бетанкур смог по внешней форме машины восстановить ее принцип действия и потом самостоятельно воссоздать подобную машину.

План и содержание курса «Построения машин» Ланца и Бетанкура повторяют и развивают таблицу «элементарных машин», составленную авторами. Таблица отличается от того варианта, который был предложен Ашеттом: она состоит из 20 колонок, обозначенных буквами латинского алфавита, и из 21 строки в соответствии с 21 типом

преобразования движений, предлагаемых авторами. «Движения, применяемые в искусствах, бывают или прямолинейными, или круговыми, или следующими какой-либо кривой; они могут быть непрерывными или возвратно-поступательными, и, следовательно, их можно комбинировать по два пятнадцатью различными способами или же двадцатью одним способом, если каждый способ движения комбинировать также и с самим собой. Назначением каждой машины является преобразование или передача одного или нескольких из этих двадцати одного движения»¹¹.

Интересно, что в противоположность жесткой логике строчек заполнение колонок не обусловлено никакими принципиальными положениями.

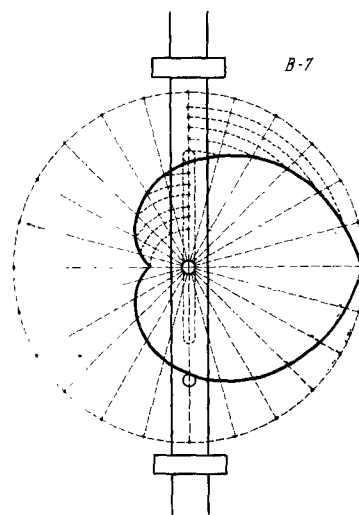
Клетки, полученные в результате пересечения строк и колонок, заполнены не целиком. Кроме того, 10 строк не делятся на клетки, а содержат лишь ссылки на другие строки; строки 7 и 9 дублируются. Таким образом, в таблице собраны 134 варианта элементарных машин, 120 клеток остались незаполненными, так как соответствующие формы элементарных машин не были известны авторам книги. Элементарные машины, в символике авторов, обозначаются цифрой строки и буквой колонки.

Итак, Ланц и Бетанкур смогли обнаружить среди известных им машин XVIII в. лишь 134 различные формы преобразований движений. Большинство этих форм, пользуясь современной терминологией, можно было бы назвать механизмами, но некоторые из них являются вполне развитыми машинами.

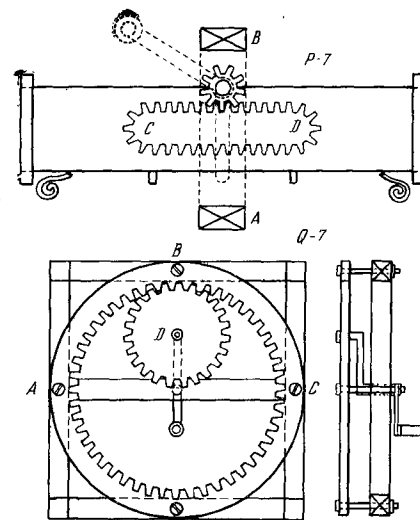
Книга построена в виде пояснительного текста к таблице элементарных машин, составленной авторами. К книге приложена и вторая таблица элементарных машин, составленная Ашеттом, которая будет разобрана ниже.

Первая строка таблицы посвящена преобразованию прямолинейного непрерывного движения с равномерной скоростью или со скоростью, изменяющейся по некоторому заданному закону, в движение того же вида. Как указывают авторы, единственными двигателями, которые могут вызвать непрерывное прямолинейное движение, являются воздух и вода (включая и пар). Для преобразования такого движения тогда были известны 8 вариантов элементарных машин (от B—1 до I—1). Сюда относятся

¹¹ Lanz et Bethencourt. Essai sur la composition des machines, p. 1.



«Элементарная машина»
B-7



«Элементарная машина»
P-7 и O-7

шкивы, полиспасты, спарник, механизм подачи каретки перетен в «Мюль Джени» (с помощью гибкой связи), каретка, передвигающаяся на роликах, механизм клинового пресса, водоподъемная машина Монгольфье.

Вторая строка содержит элементарные машины, служащие для преобразования непрерывного прямолинейного движения в прямолинейное же возвратно-поступательное. Этот тип преобразований авторами не разработан, и в книге имеется лишь отсылка к некоторым гидравлическим преобразователям.

В третьей строке собраны элементарные машины, преобразующие прямолинейное непрерывное движение в непрерывное вращательное. Здесь разобраны 12 элементарных машин: ворот, колесо в зацеплении с зубчатой гребенкой, винт с гайкой, обратный архимедов винт, т. е. в сущности турбина, водяные колеса, ветряная мельница, паровая и ветряная турбины.

В четвертой строке приводятся элементарные машины, служащие для преобразования прямолинейного непрерывного движения в возвратно-поступательное движение по

кругу. Это преобразование представлено четырьмя элементарными машинами, из которых в трех используется давление воды, а четвертая является комбинацией рычагов.

О самом большом числе элементарных машин — 35 — идет речь в § 7. В таблице ему соответствуют строки 7 и 7'. Это группа элементарных машин, преобразующих непрерывное вращательное движение в возвратно-поступательное прямолинейное. Для этой цели техника XVIII в. пользовалась разными механизмами. Так, под *A—7* и *B—7* разобраны кулачковые механизмы, за которыми следуют механизмы с зубчатыми гребенками и зубчатыми сегментами, кривошипно-ползунные механизмы и их преобразования, зубчато-шарнирные механизмы, винт с прямой и обратной нарезкой, механизм Лагира, дифференциал и ряд различных зубчатых механизмов. Интересно, что авторы уже разбираются в родстве отдельных механизмов, между которыми нет внешнего сходства: примером могут служить элементарные машины *M—7* и *L—7*, о которых указывается, что первый является модификацией второго.

Под *Q—7* помещен механизм Лагира, состоящий из двух колес внутреннего зацепления, причем диаметр внешнего колеса равен удвоенному диаметру внутреннего и, таким образом, каждая точка начальной окружности последнего описывает диаметр большого колеса.

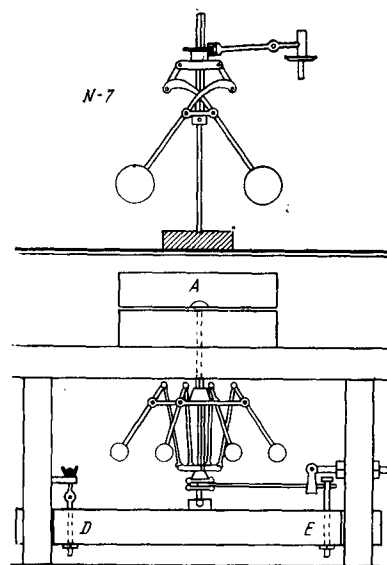
Под *A—7'* приводится коленчатый вал со ссылкой на его применение и его теорию¹².

Механизм центробежного регулятора *N—7'* приводится с комментарием Бетанкура, который указывает, что виден, как он применяется «в Англии на ветряной мельнице для подъема вращающегося жернова». Далее, под *O—7'* показана схема мельницы, приводимой в работу энергией морского прилива и отлива. Горизонтальное колесо мельницы представляет собой прототип турбины.

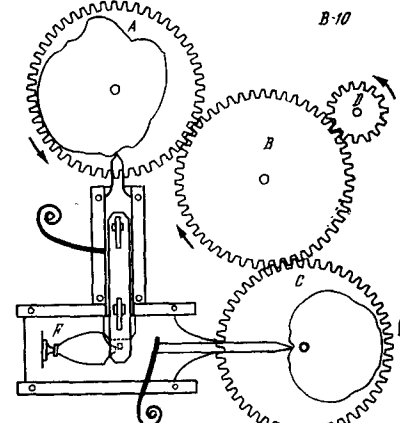
Параграф VIII содержит сведения об элементарных машинах, применяемых для преобразования непрерывного вращательного движения в непрерывное же вращательное. Сюда относятся 17 схем: несколько вариантов гибкой передачи, зубчатые механизмы, в том числе редукторы, шарнир Гука, который Бетанкур и Бреге¹³ использовали

¹² Prony. «Journal des mines», 1945, N 3, S. 13.

¹³ Луи Авраам Бреге (Louis-Abraham Breguet, 1747—1823) — знаменитый механик и часовщик, друг Бетанкура. Член Парижской академии наук. Работы в области физики и механики.



«Элементарная машина»
N-7



«Элементарная машина»
B-10

в своей модели оптического телеграфа. В IX параграфе рассматривается вопрос о преобразовании непрерывного вращательного в возвратно-вращательное движение. На рубеже XVIII и XIX вв. этот вид преобразования движения был весьма популярным (ножной привод самых разнообразных станков и устройств): по количеству схем (25) этот вид занимает второе место в книге. Сюда относятся самые различные механизмы: кулачковые с качающимся толкателем, ряд коромысловых механизмов, несколько схем часовых механизмов. Много ссылок на механизмы, которые применял Бреге. В этом параграфе к часовой технике непосредственно относится 15 схем, и описаны они очень детально на стр. 70—86.

Параграф X посвящен механизмам, служащим для преобразования кругового непрерывного движения в движение по заданной кривой. Всего разобрано 10 схем, и, кроме того, приведена схема общего решения этой задачи (*A—10*). Вот текст этого решения, который тем более интересен, что в сущности лишь этот параграф объединен об-

щей идей, и все 10 схем являются, по крайней мере по мнению авторов, лишь частными случаями общего решения.

«Мы видели, что непрерывное вращательное движение можно преобразовать в прямолинейное возвратно-поступательное, и поскольку все точки какой-либо плоской кривой можно отнести к двум координатным прямым, то нетрудно будет обвести, например, острием карандаша любую плоскую кривую, заданную в пространстве, следовательно, и начертить эту кривую на плоскости.

Пусть F — заданная кривая. Требуется, чтобы острие карандаша или какого-либо инструмента воспроизвело эту кривую на поверхности PQ при помощи непрерывного вращательного движения колеса D . Следует взять три зубчатых колеса A, B, C подходящей величины... которые приводятся в движение с помощью колеса D . Пусть tp и pq будут две линейки, которые должны двигаться возвратно-поступательно, сохраняя свое направление при помощи цапф или кулис a, e, c, d . Они заканчиваются в t и q двумя перпендикулярными линейками rs, tu , каждая из которых снабжена продольным пазом. Карандаш или инструмент, который должен воспроизвести заданную кривую, устанавливается на пересечении обоих пазов. На заданной кривой берут произвольное число точек, которое, как нами было указано выше ($A-7$), нужно увеличить в тех местах, где изменение кривизны является более резким, следуя в этом случае методу, предложенному в указанном параграфе. На поверхностях A и C проводятся соответствующие кривые, которые должны быть такими, чтобы концы p и r толкателей, прижимаемые к этим рельефно выполненным кривым, и при помощи пружин или иным способом, обеспечивали на пересечении пазов для карандаша прохождение по всем выбранным точкам. На основании пояснения, данного ранее ($A-7$), это не представит никакого затруднения»¹⁴.

Это общее решение задачи разъясняется затем на примерах соответствующих элементарных машин. Так, в пункте $B-10$ говорится: «... в технике (*dans les arts*) недостаточно получить желаемый результат; необходимо, кроме того, прийти к нему с помощью самых легких и про-

стых конструкций, которые были бы прочны и наилучше подходили к привычкам рабочих. Вообще для выполнения всех этих условий необходимо разделить движения между различными частями машины, а поскольку такое разделение является произвольным, то цель может быть достигнута различными способами»¹⁵.

Частные случаи применения общего решения задачи начинаются с примера $C-10$, в котором приводится второе общее решение той же задачи. Авторы различают два типа воспроизводимых кривых: 1) замкнутые кривые, внутри которых можно найти такую точку, что все прямые, проходящие через нее, пересекут кривую лишь в двух точках; 2) замкнутые кривые, не обладающие этим свойством. Авторы указывают способы воспроизведения обоих типов кривых.

В некоторых параграфах авторы делают отсылки к предыдущим параграфам, не приводя специальных для этих случаев элементарных машин; это относится к § XI, XII, XIII, XV, XVI, XVIII, XXI. Иногда, как в § XIV, посвященном преобразованию криволинейного движения в криволинейное же, приводится только одно решение: в данном случае — пантограф.

Более подробным является § XVII, к которому относятся механизмы, служащие для преобразования прямолинейного возвратно-поступательного движения в движение возвратно-поступательное по дуге круга: в него включено 13 механизмов и есть замечание ($A-17$) о том, что часть преобразований § III и VII также относятся к этому параграфу. Элементарные машины этого параграфа чрезвычайно разнообразны. Среди них есть зацепление гребенки с колесом, передача балансиром, шарнирные механизмы, приводы с гибкими звеньями и ряд других.

Параграф XIX посвящен механизмам, служащим для преобразования качательного движения по дуге окружности в подобное же движение. Под $A-19$ указано, что задача решается всеми механизмами § VIII и некоторыми механизмами § IX. Кроме того, приводятся пять элементарных машин, сводимых к педальному приводу.

Элементарные машины § XX служат для преобразования качательного движения по дуге окружности в качание по заданной кривой. Вслед за замечанием $A-20$ о том, что

¹⁴ Lantz et Bethencourt. Essai sur la composition des machines, p. 86—87.

¹⁵ Там же, с. 87.

решение проблемы дается всеми движениями, разобранными в § X, три схемы элементарных машин приводятся дополнительно. Из них $B-20$ и $D-20$ представляют собой сложные механизмы, тогда как $C-20$ является траекторной парой.

Таким образом, первая классификация механизмов — это скорее классификация форм, чем их кинематического содержания. Очевидно, что механизмы, имевшие разную форму и попавшие поэтому в разные отделы таблицы, следовало бы поместить в одну клетку. Затем среди элементарных машин есть и настоящие машины, что, впрочем, признают и сами авторы, и просто кинематические пары. В этом — основная непоследовательность классификации.

Авторы не ограничиваются описанием элементарных машин. Они ссылаются на литературу, в которой можно найти более подробные сведения по тому или иному вопросу, указывают на изобретателей отдельных элементарных машин, разбирают применение элементарных машин, причем не только фактическое, но и возможное. Расчеты, за очень небольшим исключением, в книге нет: их еще предстояло разработать. Исключений немного: так, в параграфах, посвященных водяным колесам, приводятся элементарные расчеты скорости вращения колес; иногда сообщаются лишь формулы, без пояснения. В том разделе, где описаны ветряные мельницы с вертикальным расположением крыльев, излагаются некоторые сведения о профилировании крыльев, о наклоне плоскости крыла к плоскости, перпендикулярной оси вращения. Здесь же приводится ссылка на статью Кулона о производительности мельниц, а также на один мемуар Эйлера.

Второе дополненное издание «Курса построения машин» было опубликовано в Париже в 1819 г. План книги и общая ее композиция остались неизменными, но были добавлены описания ряда новых механизмов, в связи с чем число вспомогательных таблиц увеличилось (10 — в первом издании, 12 — во втором).

Всего во втором издании было описано 152 механизма, т. е. на 18 механизмов больше, чем в первом. Некоторые из новых механизмов представляют большой интерес. Так, механизмы, описанные под номерами $S-7'$ и $T-7'$, служат для приближенного преобразования кругового движения в прямолинейное возвратно-поступательное. Наряду с прямилком Уатта это первые шарнирные механизмы, пред-

назначенные для преобразования движения. Сам Бетанкур неоднократно применял их для этой цели.

В 20-й строке под $D-20$ приведен механизм станка для рассверловки пушечных стволов. Этот, а также некоторые другие механизмы, описаниями которых пополнена книга, отражают изобретательскую деятельность Бетанкура и его друзей, в частности Бреге.

Повысился и научный уровень книги. В текст отдельных параграфов было введено много новых замечаний, указаний на методы расчетов механизмов, на новую литературу. В § III добавлен полный текст мемуара профессора Политехнической школы А. Т. Пти (1791—1820) о применении принципа живых сил к вычислению действия машин.

Третьим изданием «Курс построения машин» вышел в 1840 г., после смерти обоих авторов.

Значение курса Ланца и Бетанкура для нарождающегося машиностроения было очень велико. Это одна из первых книг, в которой были поставлены вопросы теории механизмов и намечены пути их разрешения. Она служила в качестве учебника во всех европейских высших технических школах на протяжении почти полувека, а кроме того, была справочником для конструкторов и машиностроителей, так как в ней были систематизированы и объяснены почти все основные механизмы, применявшиеся техникой первой четверти XIX в. Систематическое распределение механизмов по определенному признаку — признаку преобразования движений — облегчало ознакомление с машинами и служило квалифицированным введением в машиноведение. Не следует забывать, что в те годы была лишь единая наука о машинах. Многие исследователи пользовались классификацией Монжа — Бетанкура — Ашетта с теми или иными изменениями почти до начала XX в., а идея преобразования движений актуальна до настоящего времени.

Сводные таблицы книги, кроме публикации в ее переводах, попали в другие книги в качестве иллюстраций. В середине XIX в. в США был опубликован Эппльтоновский словарь по машинам¹⁶, в котором была принята система Ланца—Бетанкура и частично использованы схемы из

¹⁶ Appleton's Dictionary of Machines. Engine-Work and Engineering. 2 vols. New York, 1851.

«Курса построения машин». По-видимому, часть схем была просто напечатана с таблиц, подготовленных для одного из переизданий «Курса». В 1873 г. в Лондоне был издан «Инженерный словарь»¹⁷, в который опять-таки попали те же самые схемы, но уже вычерченные заново. К ним было добавлено много схем новых механизмов, составленных по тому же принципу. В XIX—начале XX в. как в Европе, так и в США появилось несколько таких справочников, которые, знакомя читателя с возможными решениями той или иной задачи, тем самым давали возможность создавать новые механизмы и новые машины, т. е. исполняли функции экспериментального метода синтеза механизмов.

Однако «Курс построения машин» после выхода в свет приобрел и недругов. Отмечались многие его недостатки: и непоследовательность в изложении, и неясность понятия «элементарная машина», невыработанность терминологии, отсутствие данных для расчетов, разбросанность подобных по построению и по действию механизмов по различным отделам книги. Некоторые критики писали, что книга не может служить учебником, что на основании принципа Монжа нельзя построить методiku изучения подобных механизмов и что авторы совершили грубую ошибку, включив в состав своих «элементарных машин» жидкие и гибкие звенья.

Но и сторонники, и критики «Курса построения машин» называют его «знаменитой книгой» и никто не оспаривал того, что именно в ней был поставлен ряд проблем, критическое осмысливание которых и породило современную науку о машинах. Монж и его последователи не смогли полностью выяснить сущность понятия механизма, но одну из ее сторон — преобразование движения — они изучили очень глубоко. Понятие кинематической основы в теории механизмов, идеи синтеза механизмов, принципов научного построения машин и поиски их рациональных форм, наконец постановка ряда конкретных задач — все это давало машиностроителям первой половины XIX в. материал для размышлений.

Поэтому «Курс построения машин» Ланда и Бетанкура по праву открывает список классических произведений науки о машинах.

¹⁷ E. F. and N. Spoon. The Dictionary of Engineering. London, 1873, p. 2421—2452.

Уже через три года по выходе в свет первого издания «Курса», в 1811 г., Ашетт издал новый учебник по предмету, который он читал в Политехнической школе под названием «Элементарный курс машин»¹⁸.

Эта основная работа Ашетта¹⁹ по теории машин состоит из трех глав. Первая глава посвящена принципам построения машин и основам их динамики, вторая — элементарным машинам, а третья, в соответствии с планом Монжа, — машинам, применяемым на строительных работах.

В предисловии Ашетт определяет задачи курса построения машин, отмечая его пропедевтичность по отношению к теоретической механике. Поэтому из курса почти полностью исключаются выводы формул, приводятся только краткие расчетные данные и основное внимание уделяется описательной части.

Прежде чем приступить к изложению основ курса, Ашетт определяет объект своего исследования — машину: «Система закрепленных или подвижных тел, связанных между собой таким образом, что движение, сообщенное одному из этих тел, передается другим телам той же системы, называется машиной. Задачей каждой машины является преобразование действия двигателя; последнее сообщается одной из ее частей и переносится на другую часть, которая, таким образом, сама становится двигателем. Первая из этих частей непосредственно связана с действием, а вторая — с системой подвижных тел, называемой сопротивлением. В этом курсе мы будем рассматривать только такие машины, в которых точки, связанные с действием и сопротивлением, описывают прямую линию или круг».

Основной задачей машины Ашетт, следуя Монжу, считает преобразование движений. Как и в первой своей

¹⁸ Hachette. Traité élémentaire des machines. Paris, 1811.

¹⁹ Жан Никола Пьер Ашетт (Jean Nicolas Pierre Hachette, 1769—1834) родился в Мезьере. С момента открытия Политехнической школы работал под руководством Монжа на кафедре начертательной геометрии. Редактировал «Журнал Политехнической школы». В 1810 г. был назначен профессором факультета наук Парижского университета.

Республиканские убеждения Ашетта привели к тому, что в 1816 г. он был уволен из Политехнической школы, а в 1823 г. Людовик XVIII вычеркнул его из числа новоизбранных членов Парижской академии наук (он был восстановлен в 1830 г.).

таблице, приложенной к книге Ланца и Бетанкура, Ашетт распределяет все элементарные машины на 10 серий. Основанием для этого служит принятое им положение, на котором он особенно настаивает во втором издании своей работы, что всякий механизм любой сложности «построен из простых механизмов, являющихся комбинациями двух из четырех движений: кругового непрерывного, прямолинейного непрерывного, кругового возвратного, прямолинейного возвратного». В каждой из элементарных машин Ашетт различает три движения: движение, производимое двигателем, прямолинейное для всякого двигателя; движение круговое или прямолинейное той части машины, которая непосредственно воспринимает движение от двигателя и передает его следующей части машины; движение прямолинейное или круговое, передаваемое сопротивлению, т. е. рабочему органу машины.

Таким образом, у Ашетта уже достаточно четко оформляется мысль Эйлера о трех составных частях машины, которые, правда, еще не приобрели точных наименований. Кроме того, Ашетт относит это деление лишь к элементарным, которые сами не имеют точного определения. Позже понятие элементарной машины переродилось в понятие механизма, но некоторые свойства элементарных машин были перенесены на машины вообще и, таким образом, положение Ашетта получило известное обобщение. В качестве примера Ашетт рассматривает ворот, служащий для подъема воды из колодца (попадающий в соответствии с систематикой Ашетта в число элементарных машин). Двигатель действует с силой, направленной по касательной к окружности, описываемой концом рукоятки, а ведро с водой поднимается по вертикали; вал и рукоятка ворота воспринимают действие непосредственно от двигателя и передают его на канат, огибающий вал. Ашетт называет в этом случае канат вторичным двигателем, сообщаящим грузу (ведру с водой) прямолинейное движение.

Первая глава книги содержит ряд сведений по динамике двигателей. Ашетт, следуя в этом случае традиции XVIII в., рассматривает четыре вида двигателей: силу животных, давление воды и ветра и действие тепла. В качестве единицы действия двигателя он принимает произведение силы на соответствующую скорость. За единицу работы Ашетт принимает динамическую единицу, равную одному тонно-метру (*grand unité dynamique*).

На основании ряда опытов Ашетт определяет количество работы, получаемой в разных случаях использования живых двигателей, воды, ветра и паровой машины, описывает основные системы этих двигателей. В неявной форме вводит понятие коэффициента полезного действия («достоинство машины, получающей действие от двигателя, чтобы перенести его к заданному сопротивлению, существенно зависит от отношения между затраченной силой и произведенным при помощи этой силы усилием»).

Во второй главе учебника Ашетт рассматривает отдельные элементарные машины. Он указывает, что не все они применяются в машинах одинаково часто, а поэтому основное внимание следует обратить на те из них, которые являются наиболее употребительными, т. е. на кулачковые и зубчатые механизмы. Таким образом, впервые эти две важнейшие группы механизмов были выделены в учебнике в отдельные разделы. Ашетт относит их к шестой серии, которая обозначена *CC* (преобразование вращательного движения во вращательное); впрочем, частично они появляются и в других сериях. При исследовании зацепления цилиндрических зубчатых колес с параллельными осями Ашетт устанавливает, что отношение угловых скоростей двух колес, находящихся в зацеплении, обратно пропорционально отношению радиусов начальных окружностей. Затем он рассматривает вывод свойств циклоидального зацепления (эвольвентное зацепление не рассматривается), построение кривых и профилирование зубьев по циклоиде. Расчеты, приводимые Ашеттом, приближительны: впадина по начальной окружности «несколько шире» зуба.

В этом же параграфе Ашетт рассматривает геометрическую теорию зацепления колеса с рейкой и конического зацепления.

Третья глава учебника Ашетта состоит из описания и несложных расчетов машин, применяемых на строительных работах. Рассматриваются ворота, кабестаны, блоки, подъемные краны, копры, механические пилы и машины, применяемые при расчистке портов. Во всех этих машинах, за исключением пил, передача движения производится при помощи гибких органов — льняных или конопляных канатов.

Книга Ашетта выдержала четыре издания: в 1811, 1814, 1819 и 1828 гг. Такое количество изданий за относительно небольшой срок показывает, что она нашла своего

читателя. Спрос на техническую книгу резко возрос, тем более что в начале XIX в. во Франции очень быстро происходило перевооружение промышленности: промышленный переворот был в своей кульминационной точке.

«Прядильное производство из хлопчатой бумаги начало применять самые совершенные машины из известных в Европе, причем сначала импортировали оттуда же и все улучшения, но затем наши изобретатели сами внесли в машины много нового. Достаточным будет сравнить цифры ввоза хлопчатобумажной пряжи за три года (1787—1789), когда было импортировано на 25 млн. франков, и за шесть лет (1812—1818) — менее чем на 1,5 млн. франков», — писал видный французский экономист профессор Политехнической школы Ж. Шапаль (1756—1832). Однако Франция все еще оставалась позади Англии как по количеству применяемых машин, так и по общему выпуску готовой продукции. Шапаль пишет далее: «Мы во Франции еще далеко не имеем такого обилия машин, как Англия: в этой последней машины применяют на всех работах, всюду руку человека заменяют механизмами; огневые машины приводят в движение все операции в цехах, и все же значительная часть населения там живет за счет труда в мануфактурной промышленности. Если мы не дали такого большого применения машинам, как англичане, то потому, что рабочие руки у нас менее дороги и что низкие цены горючего в Англии позволяют там везде с выгодой применять паровые машины»²⁰.

Большое внимание развитию французской промышленности уделял Наполеон. В 1810 г. во Франции был образован Совет по делам фабрик и мануфактур, а в 1811 г. создано министерство мануфактур и торговли. В стране начало развиваться машиностроение: в 1805—1806 гг. две мастерские строили мюль-машины. Появились и собственные конструкции машин: станок Жаккарда для производства шелковых тканей (1805) и льнопрядильная машина Жирара (1810). Однако паровые машины все еще насчитывались единицами.

В годы реставрации (1814—1830) во Франции началось применение машин в сельском хозяйстве. В промышленности возникают крупные фабрики и заводы, хорошо оснащенные машинами. На смену гидравлическим двига-

телям пришли паровые машины. В 1820 г. во французской промышленности было всего 39 паровых машин, из которых 27 работали в текстильной промышленности; в 1826 г. их общая мощность составила 6,3 л. с. К 1830 г. во Франции было уже около 600 паровых машин общей мощностью в 10 тыс. л. с. Машины появились и в других отраслях промышленности.

Важным фактором в деле становления машинного производства стала наука о машинах, развивавшаяся во взаимодействии с механикой.

Еще в конце XVIII в. во Франции была разработана система аналитической механики. Ее создатель Жозеф Луи Лагранж (1736—1813) родился в Турине. С ранних лет он занимался математикой и в возрасте 19 лет получил кафедру математики в Туринской артиллерийской школе. В 1759 г. он по рекомендации Эйлера был избран в Берлинскую академию наук, а в 1766 г. заменил в ней Эйлера (после отъезда Эйлера в Петербург). В Берлине он начал работать над аналитической механикой, но издал ее лишь в 1788 г. в Париже.

Своей особой заслугой Лагранж считал то, что он превратил механику в отрасль анализа, сведя ее законы к простым уравнениям. Ему принадлежат понятия обобщенных координат и обобщенных сил. Особенно важным для прикладной механики оказался общий вывод уравнения живых сил.

С 1787 г. Лагранж переехал в Париж. После революции он читал в Политехнической школе лекции по математическому анализу и, таким образом, стал непосредственным учителем целого поколения французских механиков. Подобно Даламберу, он непосредственно не занимался механикой машин, но его труды послужили основанием для целого ряда теорий и методов прикладной динамики, многие из которых развились значительно позже.

В 20-х годах XIX в. над вопросами науки о машинах работал Джузеппе Антонио Борньи (1781—1863). Он был профессором университета в Павии и членом Туринской академии наук, основанной в середине XVIII в. Лагранжем и группой его учеников.

Основной труд Борньи был издан в 1818—1820 гг. в Париже под общим названием «Полный курс механики в приложении к технике» в восьми томах — первое сочинение по «прикладной» механике. Эта работа представляет

²⁰ Chaptal. De l'industrie française, v. II. Paris, 1819, p. 8.

TRAITÉ COMPLET DE MÉCANIQUE

APPLIQUÉE AUX ARTS,

CONTENANT l'Exposition méthodique des théories et des expériences
les plus utiles pour diriger le choix, l'invention, la construction et
l'emploi de toutes les espèces de machines;

PAR M. J. - A. BORGNIS,

INGÉNIEUR ET MEMBRE DE PLUSIEURS ACADEMIES.

Composition des Machines

PARIS,

BACHELIER, LIBRAIRE, QUAI DES AUGUSTINS.

1818.

Титульный лист «Трактата» Борньи

собой настоящую энциклопедию машиноведения начала XIX в.; первый ее том посвящен общим вопросам теории машин, во втором томе разбираются подъемные машины, в третьем — строительные, в четвертом — гидравлические, в пятом — сельскохозяйственные, в шестом — машины, применяемые в различных производствах, в седьмом — текстильные машины и в восьмом — автоматы и театральные машины. Кроме того, Борньи издал еще две работы

по прикладной механике — «Словарь механики в приложении к технике» и «Теорию элементарной механики».

Аналитическое исследование машин Борньи несколько отклоняется от того, который был принят учениками и последователями Монжа. Его исходным положением является развитие структурной идеи, выдвинутой Эйлером и развитой Ашеттом для случая элементарной машины. Борньи устанавливает, что каждая машина состоит из частей, имеющих аналогичное назначение. Он насчитывает шесть порядков таких частей машин: приемники, передачи, модификаторы, основания, регуляторы и опоры (рабочие органы). Изучение двигателей Борньи выделяет в отдельную главу, причем относит к ним различные модификации приложения силы животных, воды, ветра и сгораемых субстанций. Каждый порядок он делит на классы, а последние — на типы (*genres*), виды (*espèces*), разновидности (*variétés*). Хотя Борньи и разграничивает понятия двигателя и приемника, все же в ряде мест он указывает, что двигатель по отношению к машине может быть не только внешним объектом, действующим на ее приемник, но иногда может войти в ее состав.

Борньи считает прикладную механику частью технологии. Исходя из этого он подразделяет прикладную механику на две части, относя к первой классификацию элементов машин, а ко второй — описание машин. Элементарные машины представлены Борньи схематически и сведены в таблицы в соответствии с принятой им систематикой.

К первому классу первого порядка (приемники) Борньи относит «зоологические» приемники, которые подразделяются на два типа: приемники, приводимые в движение силой человека, и приемники, приводимые в движение силой животных. Второй класс составляют гидравлические приемники. К этому классу автор относит гидравлические колеса, колеса, приводимые в движение силами прилива и отлива, гидравлические балансиры, норрии, винтовые приемники, приемники, воспринимающие давление водяного столба, поршневые машины. Третий класс составляют термические приемники, к которым Борньи относит приемники поршневые, беспоршневые (типа машины Савари) и вращающиеся. К четвертому классу он относит ветряные двигатели, к пятому — зависимые двигатели и новые разновидности двигателей. Под зависимыми двигателями

он подразумевает механические аккумуляторы типа весов и рессор. Борньи приводит также несколько примеров новых двигателей, не применявшихся до того времени в технической практике, например колесо, приводимое в движение ртутью, двигатель, работающий взрывами пороха, котел, нагревающийся теплом солнечных лучей, собираемых системой зеркал, и некоторые другие.

К механизмам второго порядка Борньи относит трансмиссии, или передачи. «Существует лишь незначительное число машин, в которых приемник находится в прямой связи с орудием, т. е. в которых имеется непосредственное сообщение между органом, воспринимающим работу двигателя, и тем, который производит конечное действие; местные обстоятельства, положения и распределения, вызываемые самой природой работы и удобством для обслуживающего персонала, различная природа движений, производимых приемником и рабочим органом, вот причины, определяющие применение органов, которые мы назовем передачей»²¹.

В приведенной цитате идея структуры машины уже выявляется вполне отчетливо. Двигатель, передача и орудие — вот те основные части, составляющие каждую машину и характеризующие ее с точки зрения передачи силы. Идея эта перешла с теми или иными изменениями во все книги по прикладной механике, написанные до 70-х годов XIX в. Наиболее общее выражение она получила в знаменитом определении Маркса. Позже немецкий машиновед Франц Рело, рассматривая сочинения Борньи, говорит, что его классификация оказалась нежизненной, так как из ее шести порядков практически сохранились только три: приемник (или двигатель), передача и орудие. Однако, как отмечалось выше, Борньи сам указал на преимущественное значение этих трех порядков. И, кроме того, уже в наше время еще один порядок Борньи — регуляторы — получил право самостоятельного значения.

Изучая передачи, Борньи обращает внимание на то, что они в сущности имеют два назначения: передачу движения от приемника к рабочему органу и преобразование этого движения в вид, нужный для выполнения заданной работы. Он делит передачи на два класса: передачи непо-

средственным соприкосновением и передачи при помощи промежуточных звеньев. К первому классу относятся зубчатые колеса, эксцентрики, плоские и пространственные кулачковые механизмы. В этом отношении Борньи более последователен, чем Ашетт, у которого выделение зубчатых зацеплений в отдельную группу не укладывается в принятую им систему. С этой точки зрения классификация Борньи более конструктивна.

К третьему порядку — модификаторы — Борньи относит «простые машины» и другие подъемно-транспортные устройства, «модифицирующие» силу или скорость движения, увеличивая одну и соответственно уменьшая другую. Этот порядок оказался нежизненным, он явно был унаследован от XVIII в. и представлял попытку примирить новую науку со старой. В науке о машинах он не удержался.

Вследствие неясности определения модификаторов в этот порядок попали также некоторые механизмы, уже отнесенные ко второму порядку, в частности зубчатые. Эту неопределенность Борньи поясняет тем, что при одном и том же конструктивном выполнении органа машины функция его может быть различной. Так, зубчатый механизм, выполняющий функцию передачи движения, отличается от того же механизма, основной целью которого является преобразование движения. Объяснение искусственное, и оно не пережило сочинения Борньи.

Суппорты, или основания, составили четвертый порядок. Борньи определяет их как части машин, поддерживающие другие органы и связывающие их воедино. Однако это определение вступило в противоречие с понятием органов машин как систем, передающих или преобразующих движение. В дальнейшем этот порядок также был исключен из науки о машинах.

Пятый порядок составляют регуляторы. «После обозрения органов, которые воспринимают действие от двигателя, передают его, преобразуют скорость или служат для поддержания других органов машины, для опоры ее осей, нам нужно обратить внимание на порядок регуляторов, т. е. органов, задач которых является исправление неравномерности движения, управление перерывами в движении, его возобновление, периодическое изменение и, наконец, предупреждение или уменьшение вредного действия пассивных сопротивлений». Здесь нельзя не отдать

²¹ J.-A. Bognis. *Traité complet de mécanique appliquée aux arts. Traité de la composition des machines.* Paris, 1818, p. 203.

должное проникательности Борньи, который в самом начале развития регуляторов учел контрольную и управленческую функцию этих органов.

К шестому порядку Борнья относит рабочие органы машин, действующие переносом, нажатием, трением, ударом и разделением.

Таким образом, Борнья удалось создать достаточно полную систематику органов машин. К сожалению, он непоследователен в своих рассуждениях, да и не мог быть иным: механика машин еще только зарождалась. Так, подобно Лейбольду, а возможно и следуя ему, Борнья помещает в раздел рабочих органов машин машинный инструмент и ручной режущий инструмент.

Классификация Борнья в теории механизмов не удержалась. По словам Рело, «Борнья ставит задачу более общо, чем его предшественники, и хочет произвести разделение машинных органов на шесть классов... При этом он не обращает внимания на преобразование движений как на основной принцип и руководствуется им только при дальнейшем подразделении. Да в конце концов его система и не была воспринята как такая, которую можно было бы противопоставить системе Монжа; скорее его подразделения относятся к общему машиноведению и более или менее приспособлены к последнему. Но некоторые положения схемы Борнья в дальнейшем получили всеобщее признание и вошли в золотой фонд науки. Таковыми являются понятия приемника, передачи и рабочего органа, которые в дальнейшем блестящими работами Кориолиса и Понселе были подняты до значения основ, пожалуй можно бы сказать даже, до значения символа веры современного машиностроения»²².

Однако сводить всю заслугу Борнья к выработке формулы состава машины, высказанной вдобавок в несколько менее явной форме Ашеттом, нельзя. В восьми томах своего сочинения Борнья собрал богатейший материал, характеризующий технику начала XIX в., и тщательно обработал его. Вопреки утверждению Рело, все сочинение Борнья проникнуто понятием машины именно как передатчика и преобразователя движения. «Большинство ма-

шин, — говорит Борнья, — состоит из разных частей, которые служат следующим целям.

1. Восприятие действия двигателя.
2. Передача этого действия на некоторое расстояние.
3. Преобразование движения в один из четырех элементарных видов.
4. Изменение направления движения.
5. Модификация обеих составляющих движения, силы и скорости, уменьшение одной из них за счет увеличения другой.
6. Регулирование движения.
7. Уничтожение или ослабление сил пассивных сопротивлений.
8. Выполнение операции, предназначенной для данной машины.

Есть машины, в которых один простой орган выполняет несколько функций, но много есть и таких, где лишь одна из функций выполняется сложными способами»²³. И далее: «Имя машины принадлежит только соединениям органов, построенным для приема и передачи движения... само название машины несет в себе идею движения»²⁴.

Таким образом, отрывать Борнья от школы Монжа, как это делает Рело, нельзя. Наоборот, он написал свой курс в развитие идей этой школы и исходя из ее принципов.

Следующие тома «Курса» посвящены описанию машин. Однако и здесь Борнья стремится найти общее в частном и сделать из конкретных примеров выводы, применимые и в иных условиях. Так, в трактате о строительных машинах он разбирает решение задачи о приводе нескольких машин от одного двигателя. При этом он рассматривает подобную группу машин как нечто объединенное, как систему, и выделяет в последней приемник, передачу и орудие (группу машин-орудий) так же, как и в отдельной машине.

Следом за последним томом «Курса» вышел в свет «Словарь механики в приложении к технике», в котором Борнья дает более или менее пространное пояснение понятий механики и главным образом машиноведения.

²² F. Reuleaux. Theoretische Kinematik, Bd. I. Braunschweig, 1875, S. 13--14.

²³ J.-A. Bognis. Traité complet de mécanique appliquée aux arts. Traité des mouvements des Fardeaux, p. 15.

²⁴ Там же.

«Теория элементарной механики» Борньи представляет собой введение в курс построения машин. Так как эта книга издавалась несколькими годами позже «Курса», то Борньи решил осветить в ней ряд вопросов, совсем пропущенных в «Курсе» или требующих дополнительного пояснения. Излагая классификацию Ашетта, Борньи указывает на принципиальное различие, существующее между понятиями элементарных машин и органов машин, обосновывая тем самым необходимость обеих классификаций — Ашетта и своей — как систематизирующих разные понятия.

Много места Борньи отводит изложению теории зубчатых зацеплений. Он приводит следующие условия, которым должно удовлетворять всякое правильно сконструированное зубчатое зацепление.

1. Все части зацепления должны быть точно изготовленными и точно собранными. Оси должны быть строго перпендикулярными по отношению к колесам. Зубья должны быть равными и находиться на равных расстояниях друг от друга.

2. Число зубьев должно быть большим, и в связи с этим колеса должны быть по возможности большими, а оси — как можно меньшими, насколько это разрешают условия прочности.

3. Давление между зубьями ведущего и ведомого колес должно быть возможно малым.

4. Форма зубьев должна вызывать минимальные потери.

Таковы были требования к зубчатому зацеплению на исходе первой четверти XIX в. К этому времени уже начали изготавливать чугунные литые колеса, зубья которых доводились напильником. Впрочем, в основном это были шестерни, а большие колеса обычно продолжали делать с деревянными зубьями, которые хорошо прирабатывались в процессе работы и служили отнюдь не хуже чугунных. Кроме того, они были упругими и тихими в работе. Профилировалось подавляющее число колес по циклоидальным кривым.

Как известно, в XVIII в. научные труды печатались преимущественно на латинском языке. Переход к национальным языкам наметился во второй половине столетия, и в XIX в. научные работы, как правило, печатаются на национальных языках. В связи с этим изменилась и чита-

тельская группа, к которой обращались авторы научных работ: их должны читать не только ученые, но и практики, не получившие школьной подготовки. В одном из томов «Курса» — «Трактате о строительных машинах» — Борньи указывает, что целью его было написать такую работу, которую можно было бы использовать на практике: «Элементарные части машин, описанные в первом томе, изолированы, отсоединены от своего внешнего выражения и сведены к простейшей форме. Сделано это для того, чтобы ремесленник мог легко понять их, а поняв, удержать в памяти различные их образы точно и длительно. Для этого мы и создали нашу классификацию»²⁵.

Знаменитый французский механик Вокансон собрал большую коллекцию моделей, машин и приборов, которую завещал Франции, с тем чтобы эта коллекция служила пособием для технического образования ремесленников и рабочих. Она послужила основой для создания промышленного музея, на базе которого декретом Конвента от 19 вандемьера III года (13 октября 1794 г.) была создана Консерватория искусств и ремесел (Conservatoire des arts et métiers). Это было учебно-научное учреждение, сыгравшее в истории французской техники большую роль. Здесь виднейшие ученые читали общедоступные курсы по разным направлениям прикладных и технических наук; при Консерватории были также созданы условия для выполнения научно-экспериментальных исследований.

С 1816 г. директором Консерватории был бельгийский ученый Ж. Кристиан²⁶. В 1822 г. он издал трехтомное сочинение под названием «Курс индустриальной механики». После «Прикладной механики» Борньи это была вторая попытка найти название для новой науки, адекватное ее содержанию.

Кристиан далее развивает учение о трех составных частях машины. «Если исследовать сущность механиче-

²⁵ J.-A. Bognis. Traité complet... Traité des machines que l'on emploie dans les compositions diverses, p. 1.

²⁶ Жерар Жозеф Кристиан (Gérard-Josef Christian, 1776—1832) — профессор Брюссельского атенея. С 1816 г. — во Франции. По словам Понселе, Кристиан наравне с Дюпенем, Монжем, Прони и Ашеттом сыграл важную роль в деле организации промышленного и технического образования во Франции, а также при создании и развитии прикладной механики как экспериментальной науки.

ской операции, т. е. такой операции, которая производится машинами... — пишет он, — то можно заметить, что первая группа элементов, составляющих машину, применяется исключительно для восприятия движения, получаемого от двигателя. Вторая группа специально предназначена для переноса в различных направлениях и для самых разных преобразований того движения, которое получено от двигателя первыми элементами. Наконец, третья группа элементов машин предназначена специально для выполнения того действия, которое сила должна произвести над материалом, подвергнутому механической обработке.

Несмотря на то что эти три части связаны между собой и, по-видимому, являются не чем иным, как только системой элементов, взаимосвязанных друг с другом, очевидно, что можно заменить первую и вторую группы, не меняя третьей или заменить вторую и третью, не меняя первой, или, наконец, заменить первую и третью, не меняя второй.

В самом деле, возьмем, например, какую-либо машинную операцию, например прядение, с гидравлическим колесом в качестве двигателя. При этом можно отчетливо выявить три составные части машины: 1, двигатель с приемником, который в данном случае представлен колесом; 2) валы привода и передаточные шкивы, которые преобразуют движение, получаемое от колеса, и передают его по всем этажам и во все концы цеха; 3) машины, непосредственно выполняющие прядение»²⁷.

Таким образом, в этом примере Кристиан говорит в сущности не об одной машине, а о системе машин. Впрочем, он не уточняет своего определения, которое равноценно описывает и тот и другой случай. В соответствии с принятым Кристианом понятием машины сочинению делится на три части: первая часть посвящается учению о двигателе, вторая — передаточным механизмам, а третья — машинам-орудиям. Оно не является монографией, это учебник и притом учебник, написанный в духе Консерватории, руководство для мастеров и цеховых техников. Автор стремится к наибольшей ясности и популярности изложения, сохраняя притом строгую научность

²⁷ *Christian. Traité élémentaire de la mécanique industrielle, v. I. Paris, 1822, p. 5.*

книги. Названием «Индустриальная механика» автор подчеркивает, что его сочинение является результатом работки и систематизации как эксперимента, так и наблюдения над работой машин.

Первая часть труда начинается изложением общего учения о двигателях. Кристиан рассматривает три вида двигателей: силы животных, силы природы и тепловые машины. Он еще не видит, что паровая машина становится универсальным промышленным двигателем: она пока еще — второстепенный двигатель, каким, впрочем, она и была в условиях Франции того времени. Но его педагогический метод новый: с первой же главы он вводит понятие мощности как основу для сравнительной оценки действия машин, определяя ее весом груза, умноженным на высоту подъема и взятым в единицу времени. Он рассматривает затем трение и сопротивление среды как основные причины потерь в машинах.

Вторая часть сочинения состоит из двух разделов. В первом, являющемся продолжением первой части, в которой излагалось учение о силе человека и силе воды, Кристиан излагает учение о силе ветра и паровой машине. Второй раздел посвящен механизмам, применяемым для передачи, преобразования и изменения первоначального движения, полученного от двигателя. Определяя машину как соединение частей, образующих двигатель или приемник с рабочим органом при помощи механизмов, передающих и преобразующих движение, Кристиан неоднократно подчеркивает, что машина состоит из принципиально разнородных частей. Он считает, что основной среди них является рабочий орган. Можно изменить в машине первую и вторую ее составляющие, указывает он, и все-таки сущность машины останется неизменной, поскольку не меняется та ее часть, которая выполняет полезную работу.

Далее Кристиан рассматривает вопрос относительно улучшения существующих конструкций машин. Он считает, что в плохо устроенных и плохо действующих машинах основное внимание надо обратить на улучшение механизмов передачи и преобразования движений, т. е. на вторую составляющую часть машины. Машина в целом не должна быть сложной: чем сложнее конструкция машины, тем чаще она подвергается ремонтам и тем труднее ее ремонтировать, не говоря уже о том, что и изготовление ее стоит гораздо дороже. Однако при улучшении конструкции при-

Вода не надо забывать и об остальных составляющих машины. «Этот вид улучшений может обеспечить не только экономию силы и упрощение конструкции, но и лучшее качество работы и больший выход продукции»²⁸.

По характеру применения Кристиан делит машины на два класса. К первому классу он относит машины, служащие для увеличения силы, ко второму — собственно рабочие машины. Первый класс машин, назначением которых является подъем и перемещение грузов, состоит из конструктивно несложных машин, которые должны быть прочными и выдерживать длительную работу. Наибольшие потери у машин этого класса происходят в результате трения; точное определение таких потерь, по его мнению, не возможно. Поэтому сначала следует вычислить ту работу, которую смогла бы выполнить идеальная машина, затем приближенно или опытным путем определить то количество работы, которое потеряно при ее передаче в результате трения. Разность обоих чисел и даст величину полезной работы машины.

Машины второго класса сложнее по своей конструкции. «Здесь уже нет речи о сообщении машине единственной функции — изменения движения при помощи системы передач; дело заключается в разложении этого движения и разделении его, в передаче его в тысячах различных форм и переносе его на обрабатываемое тело, в специальном характере выполнения всех условий, поставленных родом самой работы. Одним словом, задача состоит в том, чтобы построить комбинацию движений, которые иногда следуют одно за другим с неизменной точностью изменения скоростей и направлений, а иногда действуют совместно и... в определенные интервалы времени»²⁹. Следовательно, основным для машин этого класса является согласование во времени движения всех частей движения, служащего для выполнения полезной работы. Если из машины изъять механизм, непосредственно выполняющий заданную работу, т. е. машину-орудие, то остается система передач — механизм, служащий для преобразования движения. Поэтому надо хорошо изучить механизмы, чтобы в случае необходимости можно было подобрать наиболее подходя-

щий для выполнения заданной работы. Однако часто такой подбор является результатом искусства конструктора³⁰. Иногда нужно сделать предварительно работающую модель машины.

Кристиан распространяет этот метод и на проектирование механизма рабочего органа. Его также следует разложить на составные элементы, а затем найти отдельные механизмы, которые могут по частям произвести заданную работу.

В целом труд Кристиана отражает переломный период двух эпох; иногда в нем проявляются следы старых, уже отживших теорий, но его дух принадлежит началу XIX в. — эпохе бурного роста техники и завершающей фазы (для Франции) промышленного переворота. Впервые у Кристиана появляется название механизма в современном значении этого слова. Но четкого определения механизма он не дает, а иногда и просто заменяет его более, очевидно, привычным термином «элементарная машина» (иногда «элементарный механизм»). Впервые же весьма подробно и со знанием дела трактуются вопросы, относящиеся к практике конструирования машин.

Мы видели, что уже в XVIII в. была высказана (и притом неоднократно) мысль о необходимости выделения учения о движении в отдельную отрасль механики. В начале XIX в. над этим вопросом работал польский математик и философ Гёне-Вронский³¹. В 1803 г. в Марселе вышла его работа «Критическая философия, открытая Кантом и основанная на последнем принципе знания»³². Во втором разделе первого тома этой работы Вронский, следуя Канту, утверждает: «Подвижность, рассматривае-

³⁰ Там же. с. 338.

³¹ Юзеф Мария Гёне-Вронский (Józef-Maria Hoene-Wroński, 1778—1853). С 16 лет служил офицером в артиллерийских частях польской армии. После третьего раздела Польши служил в русской армии, также в артиллерии в чине подполковника. Работал в штабе Суворова, после смерти которого ушел в отставку; некоторое время учился в Германии, затем переехал во Францию, где посвятил себя научной деятельности. В 1810 г. представил Парижской академии наук свой проект единой математики. Работал в областях математики, механики, астрономии, техники, экономики и права. Им написано несколько сот трудов, большинство которых до сих пор не изданы.

³² J. Hoene. Philosophie critique découverte par Kant, fondé sur le dernier-principe de savoir. Marseille, 1803.

²⁸ Christian. Traité élémentaire de la mécanique industrielle, v. II. Paris, 1822, p. 21.

²⁹ Christian. Traité élémentaire..., v. III. Paris, 1822, p. 37.



А. М. Ампер

мая часто как таковая, составляет предмет отдельной науки, наиболее подходящим названием которой будет форонимия. Принципом этой науки служит закон образования движений, полученный от спекулятивной физики... Что же касается ее предмета, то он состоит просто в объединении, или, как говорят, в составлении данных движений, к чему сводится свойство подвижности. Форонимия является, таким образом, чистой наукой о величине движений, она относится к математике». Более подробно Вронский излагает эту мысль в сочинении, на-

писанном в 1809 г. (издано в 1879 г. в Париже под названием «Семь неизвестных неизданных манускриптов, написанных от 1803 до 1809 г.»): «...общая величина (в спекулятивном выражении) движения образует частный вид чистой величины и так же, как таковая, является предметом новой ветви математики, о чем я уже говорил...

Эта часть общей геометрии, предметом которой является собственно пространство, есть то, что мы называем просто геометрией. Я назову чистой форонимией другую часть общей геометрии, предметом которой являются законы скорости в ее спекулятивном понятии...

Наименование форонимии известно геометрам. Этимологии этого слова, а равно и предмет второй части общей геометрии привели меня к обозначению этой второй части именем чистой форонимии. Я оставляю наименование прикладной форонимии для одной из основных ветвей прикладной математики, о которой речь будет далее».

Наконец, в статье «Абсолютная архитектурная система энциклопедии человеческого знания», помещенной в первом и единственном номере журнала «Sphynx» в 1818 г., Вронский окончательно сформулировал понятие форонимии как науки о движении, причем в своей классификации наук поместил ее в раздел чистой математики с замеча-

нием: «не путать с механикой, в которую входит дополнительное понятие силы».

В 1834 г. в Париже был издан первый том работы Ампера³³ «Опыт философии наук». В ней автор ставит перед собой задачу классифицировать все отрасли человеческих знаний, не только известные, но и такие, развития которых можно было, по его мнению, ожидать в дальнейшем. На основании анализа, произведенного в этой книге, Ампер составил три таблицы под названием «Классификация человеческих знаний, или синоптические таблицы наук и искусств».

Приведем выдержки из этих таблиц, показывающие, какое место в своей систематике отводил Ампер кинематике (см. стр. 146).

В предисловии Ампер поясняет причины, побудившие его присвоить науке о движении имя кинематики: «Есть случаи, когда в греческом языке нельзя найти прилагательное, с помощью которого можно было бы построить название, подходящее для науки, если для этого нельзя воспользоваться составным существительным... Поэтому я вынужден был обратиться к другому способу — к образованию прилагательных, не известных в греческом языке, следуя все же характеру словообразования, который применяли сами греки для нужных им понятий. Таким образом, из слова *κίνημα* — движение, *συνεμνῆμα* — условия, конвенции и т. д. я вывел прилагательное *κινηματικός* — относящийся к движению; *συνεμνῆτικός* — относящийся к условиям, к конвенциям и т. д., причем они составлены подобно тому, как *δύομενικός* составлено из *δύομενη*; отсюда те имена наук, которые я назвал кинематикой, синименикой и т. д.»

В основном тексте Ампер опять останавливается на названии кинематики: «В предисловии мы видели, на ос-

³³ Знаменитый французский физик, математик и философ Андре Мари Ампер (André-Marie Ampère, 1775—1836), в 1801 г. был назначен профессором физики в Бурже, где написал «Рассуждения о математической теории игры». С 1805 г. работал в Политехнической школе сначала репетитором, а с 1809 г. профессором математического анализа и механики. В 1814 г. был избран членом Парижской академии наук. Кроме большого числа работ по математике, физике и механике Амперу принадлежит также несколько трудов в области философии. Именем Ампера названа единица силы электрического тока. Второй том «Опыта философии наук» был издан посмертно, в 1842 г.

Первая таблица

Царство	Подцарство	Ответвление
Космологические науки	А. Собственно космо- логия	1. Математика 2. Физика

Вторая таблица

Ответвления	Подответвления	Науки 1-го порядка
1. Математические науки	а. Собственно матема- тика б. Физико-математика	1. Арифметика 2. Геометрия 3. Механика 4. Уранология

Третья таблица

Науки 1-го порядка	Науки 2-го порядка	Науки 3-го порядка
3. Механика	е. Элементарная механика ф. Трансцендентная меха- ника	31. Кинематика 32. Статика 33. Динамика 34. Молекулярная механика

новании каких принципов я вывел из греческого языка все новые термины. Что же касается самих наук, которым я придал эти названия, то я не льщу себе как их первооткрывателю: они уже существовали в действительности, так как большинство из них были объектом многочисленных работ... Прежде чем я дал имя кинематики науке, разве она уже не существовала, хотя бы частично, в том, что писал Карно о геометрическом движении, и в «Курсе построения машин» Ланца и Бетанкура?»³⁴

Ампер определяет цели и задачи новой науки: «Кинематика. Много раньше, чем я начал заниматься предлагае-

мым трудом, я заметил, что в начале всех книг о движении и о силах обычно опускают рассуждения, которые в развитии виде составят науку третьего порядка, частично уже исследованную... Эта наука 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, 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 не обычным путем, как приспособления, при помощи которых изменяют направления и интенсивность силы, а иначе — как приспособления, служащие для преобразования направления и скорости заданного движения.

Таким образом, это определение становится независимым от рассмотрения сил, действующих на машину, которое может только рассеять внимание лица, желающего понять механизм... Сочинение, в котором рассматривались бы подобным образом все движения независимо от сил, было бы чрезвычайно полезным для целей преподавания...

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, от *κίνημα* — движение»³⁵.

Ампер пишет при этом, что не претендует на первенство, но он все же заслуживает благодарности за то, что указал пути и направления, следуя которым можно восполнить недостаток знаний в отдельных областях наук.

Так к концу первой трети XIX столетия механика выделилась в отдельную науку, причем ее основным содержанием оказалась кинематика — наука о движении. Интересно, что кинематика возникла как прикладная наука; теоретическая кинематика выделилась в теоретической и аналитической механике позже.

Кинематика такой, какой она возникла в первой трети XIX в., была наукой описательной; расчетных методов создано еще не было, и это ограничивало ее практи-

³⁴ А.-М. Ampère. Essai sur la philosophie des sciences. Paris, 1834, p. 31.

³⁵ А.-М. Ampère. Essai sur la philosophie des sciences, p. 50—53.

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В МЕХАНИКЕ МАШИН

ческую применимость, тем более что время сооружения машин «на глаз» уже отходило в область предания, точность исполнения деталей росла, а это предъявляло к науке о машинах новые требования.

Над созданием механики машин в начале XIX в. работали и инженеры, и математики. Мы видели, что решение некоторых задач, лежавших на стыке геометрии и учения о движении тел, привело к возникновению кинематической геометрии, которая полностью сформировалась в науку значительно позже. Однако ряд идей, высказанных в этом направлении в XVIII в., был продолжен и развит уже в первых десятилетиях XIX в. Сюда же можно отнести и некоторые задачи теории зацепления — более специализированной отрасли кинематической геометрии.

Что же касается динамики машин, то, как мы видели, она начала оформляться в науку еще в XVIII в. двумя путями: с одной стороны, проводилась экспериментальная работа над изучением силы человека и животных как двигателей; над созданием теории водяных и ветряных двигателей; в самом конце XVIII в. начинается разработка и теории паровой машины. Механики не только изучают двигатели, они пробуют вывести и некоторые общие положения. С другой стороны, выполняется и теоретическая исследовательская работа, результаты теоретической динамики начинают применять к решению общих задач теории машин.

Таким образом возникли некоторые научные направления, зачастую не связанные между собой, но сущностью которых было изучение машины в отдельных ее аспектах.

Экономика Франции первой трети XIX в. характеризуется быстрым развитием капиталистических отношений. Феодальные путы, тормозившие промышленное развитие страны в XVIII в., были уничтожены революцией 1789 г. Реставрация Бурбонов не смогла воскресить уже отмерших дореволюционных социально-экономических отношений. Власть перешла в руки буржуазии, сперва в завуалированной форме, а затем, после революции 1830 г., в форме открытого господства финансовых и промышленных воротил. Количество фабрик в стране быстро увеличивалось; одновременно прогрессировало и расслоение общества на два антагонистических класса. Общее обнищание широких народных масс стимулировало рост пролетариата и образование резервной армии капитала.

Но «крупная промышленность должна была овладеть характерным для нее средством производства, самой машиной, и производить машины с помощью машин. Только тогда она создала адекватный ей технический базис и стала на свои собственные ноги. С ростом в первые десятилетия XIX в. машинного производства машина на самом деле постепенно овладевала производством рабочих машин»¹.

К этому времени в Англии давно уже завершился промышленный переворот, она стала первой промышленной державой мира. Ранее других европейских держав освободившись от феодальных пут и вступив на путь капиталистического развития, Англия первой же сигнализировала о начавшемся промышленном перевороте, первой обзавелась универсальным двигателем — паровой машиной — и первой начала изготавливать машины машинным способом. В начале XIX в. «Англия представлялась французам стра-

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 23, с. 396.

ной недостижимых технических чудес. В конце 1814 г. Жан Батист Сей путешествует по Англии и не может прийти в себя от удивления, видя всюду, во всех отраслях промышленности, громадную распространенность машин... Знаменитый уже тогда экономист, друг Рикардо, почти потрясен чудом, которое он видит всюду в угольных районах, около Нью-Кэстля, около Лидса: паровые машины везут уголь! Сами по себе без помощи четвероногих!»².

Как указывает Маркс, «машинное производство первоначально возникло на не соответствующей ему материальной основе. На известной стадии развития оно должно было произвести переворот в самой этой основе, которую оно сперва нашло готовой, а затем развивало дальше, сохраняя ее старую форму, и создать для себя новый базис, соответствующий его собственному способу производства»³. Действительно, в промышленности XVIII в. основным способом производства была мануфактура, и она явилась тем базисом, на котором начало развиваться машинное производство. Однако «на известной ступени развития крупная промышленность приходит и в техническое противоречие (Widerstreit) со своим ремесленным и мануфактурным базисом»⁴. В начале XIX в. в Англии начинает развиваться производство средств производства: сами машины перестают быть объектом ручного, мануфактурного труда и вызывают появление новой отрасли крупного капиталистического производства — машиностроения. Само это понятие не могло появиться в XVIII в., когда машины, даже однородные, были индивидуальными по способу своего изготовления и представляли собой продукт труда немногочисленных высококвалифицированных механиков-практиков, зачастую принимавших участие в их изобретении или усовершенствовании, и возникло лишь в XIX в. Ряд крупнейших изобретений в области машиностроения связан с английской техникой конца XVIII — начала XIX в. Так, в 80-х годах XVIII в. гражданский инженер Джон Ренни (John Rennie, 1761—1821) предложил применять при сооружении мельниц вместо деревянных зубчатых колес точно обработанные чугунные и стальные литые коле-

са. Сын йоркширского крестьянина Джозеф Брама (Joseph Bramah, 1749—1814) в 1795 г. изобрел гидравлический пресс, а несколько раньше — строгальный станок по дереву.

Выше упоминалось, что с именем Модсли (Henry Maudsley, 1771—1831) связано одно из важнейших изобретений начала XIX в. — введение суппорта, высоко оцененное Марксом. Принцип суппорта не был нов, его применил, в частности, на своих станках А. К. Нартов, но все же за Модсли остается честь введения такого суппорта, который стимулировал создание металлообрабатывающего универсального токарного станка.

Генри Модсли, сын плотника из Вулвича, работал сначала слесарем в мастерской Брама, а в 1797 г. открыл в Лондоне собственную мастерскую. Он ввел в производство изготовление станков из металла (до него станки изготавливались почти исключительно из дерева). Усовершенствование им суппорта относится к 1797 г. В первом десятилетии XIX в. суппорт уже широко применялся в конструкциях станков. Это усовершенствование сразу же поставило английское машиностроение на первое место в мире.

Модсли принадлежат также изобретение точной нарезки винтов и способ фрезерования машинных зубчатых колес. В 1810 г. он вместе с Фильдом открыл фирму «Модсли и Фильд», специализировавшуюся на изготовлении больших машин, главным образом паровых.

Сын ткача Джозеф Клемент (Joseph Clement, 1779—1844) работал чертежником у Брама, а затем у Модсли. С 1817 г. он начал специализироваться на изготовлении металлообрабатывающих станков. Он усовершенствовал нарезку винтов на токарных станках. Ему принадлежит также первая попытка стандартизации резьбы — изобретение, позже завершенное Витвортом. Джозеф Витворт (Joseph Whitworth, 1803—1887) работал у Модсли и Клемента, изобрел трехкулачковый клупп для нарезки резьбы (1833), болторезный станок (1842). Он первый применил чугунное литье для изготовления станин станков. После 1841 г. работал над изобретением стандартной резьбы с углом 55°.

В начале XIX в. предпринимаются попытки применения паровой машины на транспорте. Задачу создания судна с паровой машиной успешно решил американский инженер и художник Роберт Фультон (Robert Fulton, 1765—1815).

² Е. В. Тарле. Рабочий класс во Франции в первые времена машинного производства (1815—1831). М., 1928, стр. 210.

³ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 23, с. 393—394.

⁴ Там же, с. 394.



Г. Модли

Свое первое судно он построил и испытал во Франции в 1803 г., однако на это изобретение тогда внимания не обратили. Свою деятельность Фультон продолжил у себя родине, в США; паровую машину мощностью в 20 л. с. построила для него фирма Уатт и Болтон.

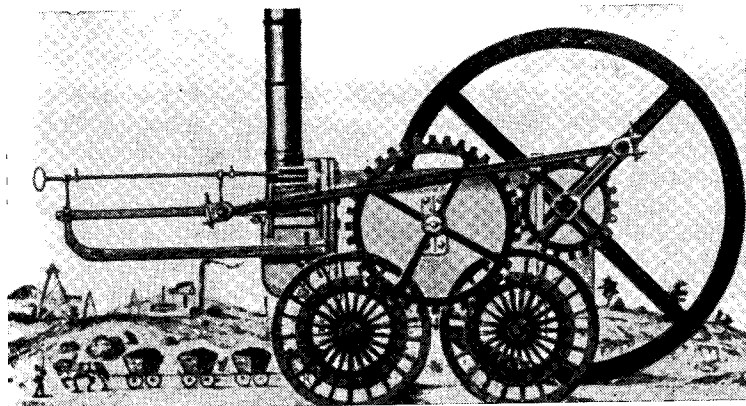
То, что Фультону удалось сделать этот заказ, было его успехом: английское правительство с целью сохранения монополии на производство паровых машин запретило их вывоз за границу. До 1803 г. было вывезено только две машины этой фирмы, в том числе одна во Францию для водопровода.

Некоторые страны строили уже и свои машины (например, Франция), но заводов для этой цели еще не было.

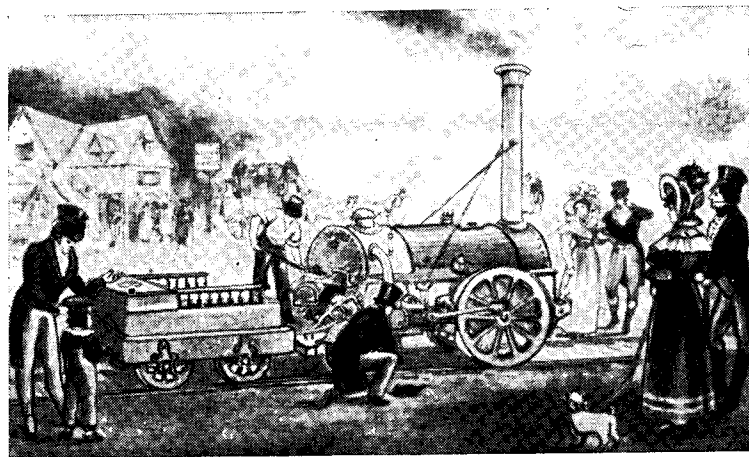
В 1807 г. Фультон закончил строительство парохода «Катарина Клермонт», а затем еще 15 пароходов. Последним было построено судно «Демологос», на котором установили 30 пушек. Это было первое паровое военное судно.

Попытки построить паровую повозку продолжались на протяжении всего XVIII в., но только в 1803 г. английский инженер Ричард Тревитик (Richard Trevithick, 1771—1833) смог построить первый в истории техники паровоз. Однако настоящим творцом железнодорожного локомотива стал Джордж Стефенсон (George Stephenson, 1781—1848), который построил свой первый паровоз в 1814 г. Несколько раньше, в 1812 г., была построена первая железная дорога между Мидлтоном и Лидсом длиной около 6 км.

В 1816 г. Стефенсон построил свой третий паровоз «Киллингворт», который мог водить составы до 50 т со скоростью 10 км/час.; в 1822 г. Стефенсон возглавил строительство Стоктон-Дарлингтонской железной дороги, которая была завершена в 1825 г. (ее протяжение 56,3 км). Для этой дороги Стефенсон построил три паро-



Паровоз Тревитика



Паровоз Стефенсона

воза новой конструкции; однако все они были еще несовершенными: потребляли слишком много пара и могли работать лишь на небольших скоростях. На Стоктон-Дарлингтонской дороге такие паровозы водили товарные составы. Одновременно Стефенсон и соперничавшие с ним

изобретатели упорно работали над усовершенствованием конструкции локомотива.

В 1826 г. Стефенсон стал главным инженером железной дороги, соорудившейся между Манчестером и Ливерпулем. В октябре 1829 г. состоялся конкурс на лучший локомотив для железной дороги (конкурировало пять паровозов). Лучшим был признан локомотив, представленный сыном Стефенсона — Робертом Стефенсоном (1803—1859) — под названием «Ракета».

15 сентября 1830 г. была открыта железная дорога Ливерпуль — Манчестер длиной 48 км. Впервые на этой дороге было обеспечено пассажирское движение с достаточной скоростью. Через десять лет в Англии было уже около 3 тыс. км железных дорог.

В 1832 г. были построены две первые железные дороги во Франции: Париж — Версаль и Париж — Сен-Жермен. Затем появились железные дороги в Германии: Нюрнберг — Фюрт (1835), Лейпциг — Дрезден (1837), Берлин — Потсдам (1838). Первая железная дорога в России Петербург — Павловск (1838) имела длину 24 км.

Развитие водного и сухопутного транспорта с использованием паровой машины в качестве двигателя имело чрезвычайно важное значение для становления и первоначального развития динамики машин. Если общее, промышленное машиностроение дало материал для создания кинематики механизмов, являвшейся в сущности теорией передач, то наблюдение и опыты над паровыми машинами явились важнейшим основанием теории машин, и как раз паровые машины транспортного назначения дали в этом отношении наибольшее количество материалов для наблюдений. Здесь имело место не только исследование работы самой машины, как в стационарных паровых машинах, но и изучение ее эксплуатации в сложных транспортных условиях; срочность выполнения необходимых научных работ повышалась еще и условиями безопасности движения, и эта срочность быстро росла с ростом железнодорожной сети.

Один из учеников и последователей Монжа — Дюпен⁵ — в работе «Производительные и хозяйственные

⁵ Шарль Дюпен (Charles Dupin, 1784—1873) по окончании Политехнической школы служил инженером во флоте. Принял участие в постройке Антверпенского арсенала, изучал порты в ряде стран,

силы» дал интересную оценку французской и английской энергетики. По его расчетам, в 1826 г. во французской промышленности работало 4,5 млн. человек и около 300 тыс. лошадей, что составляло в переводе на человеческие силы 6,3 млн. сил (1 л. с. считается равной силе 7 человек). Кроме того, 37,3 млн. сил было занято в сельском хозяйстве.

Энергетический потенциал Франции составляли 66 тыс. водяных и 10 тыс. ветряных мельниц, а также около $\frac{1}{3}$ от этих чисел промышленных установок. В переводе на человеческие силы обе страны имели (тыс. сил.)⁶:

	Франция	Англия
Мельницы и гидравлические двигатели	1 500	1 200
Ветряные мельницы	250	240
Ветер в мореплавании	3 000	12 000
Паровые машины	480	6 400
Всего неживых сил	5 230	19 840
живых сил	6 300	8 300
Живых сил в сельском хозяйстве	37 300	32 000
Всего	48 830	60 140
Было всего в 1780 г.	38 700	31 000

Таким образом, Англия в результате промышленного переворота удвоила свою энергетическую мощь, тогда как Франция смогла увеличить ее лишь на $\frac{1}{4}$. При этом существенная часть роста падает на паровые машины и мореплавание. Поэтому перед Францией встала необходимость очень быстрого подъема энергетического потенциала, создания новых отраслей промышленности, новой машинной техники. Это было одной из существенных причин того большого внимания, которое уделялось во Франции развитию технического образования и развитию науки. Возвращаясь к теории машин, отметим, что созда-

основал Морской музей в Тулоне. Член Парижской академии наук (1818), профессор Консерватории искусств и ремесел; читал лекции по геометрии и механике. Один из организаторов технического образования во Франции.

⁶ Ch. Dupin. Forces productives et commerciales, v. I. Paris, 1827, p. 26—27.

ние ее в существеннейшей части было делом ученых, так или иначе связанных с Политехнической школой.

Одновременно вырабатывается и терминология науки. Кинематической терминологии пока еще не существовало, так как сама наука и в практической и в теоретической ее части находилась в процессе становления. С динамикой машин было иначе: она возникала не только как часть учения о машинах, но и как приложение к машинам теоретической динамики, которая в трудах Эйлера, Даламбера и Лагранжа уже приняла свою классическую форму. Все основные понятия были здесь созданы, но они не были еще стандартизованы и их терминологическое выражение зависело от многих причин, в частности от научных интересов и методических предпосылок отдельных ученых. Так, произведение величины силы на длину пути ее действия Смитон называл механической мощностью, Карпо — моментом действия, Монж и Ашетт — динамическим эффектом, Кулон — количеством действия; наконец, Кориолис сформулировал и ввел понятие работы. Для измерения работы предлагалась единица, равная произведению 1 т на 1 м, которую Ашетт называл большой динамической единицей, Клеман — динами, Кориолис — динамодой. Дюпен предложил для измерения той же величины единицу, равную 1 кгм, и называл ее динамой. Навье и Понселе ввели наименование килограммометра. Уже в трудах Понселе терминология динамики машин приняла почти полностью свою современную форму.

В предисловии к разобранному выше трактату Аппетта Карно приводит некоторые замечания относительно движения машины. Он указывает, что расчет машины в состоянии покоя сводится к принципу виртуальных сил, а в состоянии движения — к принципу сохранения живых сил. Хотя, добавляет он, оба они в сущности являются частными случаями одного и того же принципа, рассматриваемого в двух различных аспектах. Но поскольку машины предназначаются для движения, поэтому главным образом и пользуются принципом живых сил, применение которого является и удобным, и общим.

Прони⁷ в своем трактате «Новая гидравлическая архитектура» также касается вопросов теории машин. Этот

⁷ Гастон Клар Франсуа Риш де Прони (Gaston Clair François Riche de Prony, 1755—1839) — инженер, математик и физик, член

трактат в сущности знаменует собой первое появление паровой машины как объекта научного исследования.

Прони повторяет мысль Эйлера о двух классах машин. Но в противоположность Эйлеру Прони считает, что машины с ускоренными и замедленными движениями все же следует отнести к первому классу, в том случае если эта неравномерность является периодической. Таким образом, первый класс у Прони всеобъемлющий, а у Эйлера он относительно невелик.

Прони вводит понятия усилия двигателя pv и усилия сопротивления $p'v'$, причем

$$pv = p'v'.$$

Основным законом динамики Прони считает принцип Даламбера. Он указывает по этому поводу: «Мы видели, что самые сложные случаи равновесия сводятся к равенству двух количеств движения, действующих в противоположных смыслах; отсюда, в соответствии с вышесказанным и при помощи общего принципа [Даламбера], вопросы движения могут быть сведены к вопросам равновесия. Это сведение производится, как это и указывается в общем принципе, разложением, т. е. при помощи параллелограмма сил, с учетом предположения, что тела сами не имеют и не имеют за счет своей собственной энергии никакой тенденции к изменению состояния. Последнее может произойти лишь при помощи некоторой внешней причины или, выражаясь одним словом, используя то свойство, которое мы называли инерцией. Инерция, равновесие и параллелограмм сил — вот основания для решения всех вопросов статики и динамики...»⁸ Прони пользуется понятием силы инерции, однако, следуя Даламберу и Лагранжу, не вводит его в изложение принципа Даламбера.

В 1810 г. горный инженер департаментов Роны, Луары и Пюи-де-Дом А. Гениво опубликовал в Лионе «Опыт науки о машинах». Автор стремился создать полную теорию машин, в каковой уже ощущалась необходимость;

Парижской академии наук (1795), директор Школы мостов и дорог (1798). Работал в области механики и гидродинамики, а также в области каналостроения. Изобрел измерительный тормоз — «тормоз Прони» (1821).

⁸ А. Guenyeau. Essai sur la science des Machines. Lyon, 1810, p. 2.

несмотря на то что Лагранж придал механике образцовую форму, к машинам эта механика в сущности была не применима. Программа Гениво интересна: «Теория машин должна составить самостоятельную науку, опыт и наблюдение составят ее основу, а рассуждения с помощью математического анализа выведут из них общие и частные законы равновесия и движения машин: она должна предоставить формулы, которые включали бы все механические свойства и с помощью которых можно было бы предвидеть и рассчитать действие машин для любых случаев»⁹.

Любопытна классификация машин, предлагаемая Гениво: он делит их на два класса. К первому классу он относит механизмы, состоящие из большого числа частей и служащие для выработки тканей, часовые механизмы и т. д., т. е. такие, которые требуют передачи определенных движений. Ко второму классу он относит те машины, которые предназначены для выработки «физических сил». Таким образом, к первому классу, по Гениво, относятся рабочие машины и передаточные механизмы, а ко второму — энергетические машины.

Для полного понимания машин, как утверждает Гениво, следует знать:

1. Условия равновесия для простых и сложных машин.
2. Простые способы передачи движения, их сравнение и комбинации.
3. Изготовление и сборку частей машин.
4. Прочность частей машин.

Для определения закона движения машины Гениво ищет выражение ускоряющей силы (ускорения).

Пусть L — плечо рычага двигателя, l — плечо рычага сопротивления. Тогда усилие двигателя — LMk ; усилие сопротивления — lmg . Пусть точка приложения двигателя находится на расстоянии R от центра вращения и на расстоянии r от приложения сопротивления. Тогда скорость первой точки будет v , а второй — $(r/R)v$. Обозначая, далее, момент инерции машины через z , получаем величину ускоряющей силы

$$\frac{dv}{dt} = \varphi = \frac{LMk - mgl}{LM + \frac{z}{R} + ml \frac{r}{R}}.$$

Дважды интегрируя это уравнение, получим уравнение машины.

При условии равенства усилия двигателя и сопротивления получим основное уравнение движения машины.

В работе Гениво находим и первую теоретическую справку о маховике: «Очень часто к вращающимся машинам добавляют одно или два очень тяжелых колеса (из литой стали), которые называются маховиками; они служат для увеличения массы машины, и к ним можно приложить все то, что сказано о машине: маховики служат для поддержания равномерности движения, в случае если двигатель или сопротивление испытывают мгновенные изменения; они сохраняют движение, когда действие двигателя или сопротивления прерывается, и противодействуют резкому изменению скорости, что могло бы привести к поломке машины... Маховики устанавливаются на всех машинах, движение которых должно быть равномерным, а скорость — постоянной...»¹⁰ При расчете маховиков следует исходить из момента инерции, для чего каждую элементарную массу надо умножить на квадрат ее расстояния от оси. Маховикам следует придавать возможно большие размеры.

Первый расчет маховика предложил Навье¹¹ в своих дополнениях к «Гидравлической архитектуре» Белидора. Он предположил, что к кривошипу, составляющему одно целое с маховиком, приложена постоянная внешняя сила, действующая попеременно в одну и другую сторону. Коромысло и поршень он считал лишними массы, а длину шатуна — бесконечно большой. Для расчета Навье воспользовался законом живой силы¹².

В 1819 г. вышло в свет второе издание «Курса построения машин» Ланца и Бетанкура. Среди включен-

¹⁰ A. Guenyeau. Essai sur la science des Machines, p. 59—60.

¹¹ Луи Мари Анри Навье (Louis-Marie-Henri Navier, 1785—1836) — французский математик, механик и инженер. Окончил Политехническую школу (1804) и Школу мостов и дорог (1808). Профессор Школы мостов и дорог (1820) и Политехнической школы (1831). Член Парижской академии наук (1824). Один из творцов строительной механики и теории упругости.

¹² Алексис-Терез Пти (Alexis-Thérèse Petit, 1791—1820) — физик, 16 лет был принят в Политехническую школу и в 1809 г. окончил ее вне конкурса. Репетитор по анализу, по физике, профессор (1815) Политехнической школы.

⁹ A. Guenyeau. Essai sur la science des Machines, p. 17.

ных в курс новых материалов был и мемуар Пти¹³, озаглавленный «О применении принципа живых сил к вычислению действия машин». Пти ссылается на то, что применение принципа живых сил к изучению машин общепринято. Однако его применяли фактически так мало, что теорию машин, рассматриваемую с этой точки зрения, еще предстоит создать.

Он строит уравнения для сопротивлений и для двигателя в такой форме

$$gMH = \frac{1}{2} Mv^2,$$

и приходит к следующему выводу: «Живая сила, сообщенная сопротивлению, равна той, которой обладал двигатель, уменьшенной на живые силы, потерянные при резком изменении скорости, и той, которую сохранил двигатель, выполнивший свое действие»¹⁴. «Предположим, — говорит далее Пти, — что жидкость находится в горизонтальном сосуде, замкнутом с одного конца, внутри которого помещен подвижной поршень. Обозначим через b сечение сосуда и через a длину цилиндрической колонны, заполненной жидкостью и заключенной между основанием сосуда и поршнем. Назовем h высоту колонны воды, вес которой уравнивает упругость этой жидкости, и предположим, наконец, что поршень не находится ни под каким внешним давлением. То давление, которое сообщается ему изнутри, заставит его двигаться ускоренно.

Составим соответствующее уравнение.

Если обозначить через v скорость, приобретенную после некоторого времени t , и через x длину цилиндра, заполненного в то же мгновение жидкостью, то заметим, что упругость ее будет равна ha/x и, следовательно, движущая сила будет $gshab/x$, где g — интенсивность веса, а s и b — размеры. Но движущая сила воды вообще представляется через mdv/dt , где m — масса поршня, откуда

$$mv dv = g \frac{snbh}{x} dx.$$

Интегрируя и определяя постоянную так, чтобы $v=0$ при $x=a$, найдем

$$mv^2 = 2g\delta hab \log \frac{x}{a}.$$

Если поршень поддерживает своей внешней поверхностью постоянное давление, измеряемое весом колонны воды, высота которой равна h' , то легко найдем для живой силы

$$2g\delta b \left\{ ha \log \frac{x}{a} - h'(x-a) \right\}.$$

Наконец, если внутреннее давление само постоянно, что имеет место в случае поступления новой порции жидкости в каждый момент, для компенсации уменьшения упругости... получаем

$$2g\delta b(h-h')(x-a).$$

Этот последний случай, очевидно, относится к паре в огневом насосе»¹⁵. В приведенной цитате уже ясно чувствуется влияние паровой машины на создание нового учения о машинах.

Важное значение для создания динамики машин имело творчество выдающихся механиков — Пуассона, Пуансо, Кориолиса, Понселе; все они в той или иной степени были связаны с Политехнической школой.

Симеон Дени Пуассон (Siméon Denis Poisson, 1781—1840) в 1798 г. был принят первым по конкурсу в Политехническую школу, где сразу проявил свои выдающиеся способности. По окончании школы в 1800 г. Пуассон был назначен репетитором по кафедре математического анализа. В 1806 г. он получил кафедру анализа, в 1812 г. был избран в Парижскую академию наук, а в 1816 г. получил кафедру механики в Сорбонне. В 1837 г. Пуассону, как члену королевского университетского совета, было поручено руководство преподаванием математики во всех средних школах Франции.

Основные работы Пуассона относятся к математической физике и аналитической механике. Наиболее важное значение для науки о машинах имеет его «Курс механики», изданный в двух томах в 1811 г.

¹⁵ Там же, с. 24.

¹³ Belidor, Navier. Architecture hydraulique. Paris, 1819, p. 384—392, note p. 6.

¹⁴ Petit. Sur l'Emploi du principe des forces vives dans le calcul de l'effet des machines.—Lanz et Bethencourt. Essai..., 2-de ed. Paris, 1819, p. 23.



С. Д. Пуассон

Курс этот состоит из четырех частей: статике, динамики, гидростатики и гидродинамики. В статике Пуассон рассматривает условия равновесия «простых машин», от которого переходит к рассмотрению общего закона равновесия машин. При выводе последнего он пользуется принципом виртуальных перемещений: полагая заданной схему некоторой машины, прилагают к двум ее точкам, связанным между собою, две силы, которые уравниваются. Малейшее изменение величины одной из этих сил нарушает равновесие и каждая из точек описывает элемент дуги. Может случиться, что эти силы бу-

дут действовать в направлении линий, описанных их точками приложения (иначе между этими направлениями образуются углы).

В первом случае отношение сил при равновесном состоянии машины будет равно обратному отношению виртуальных перемещений точек приложения этих сил; во втором случае за виртуальные перемещения принимают проекции малых путей, соответственно описанных ими, на направления приложенных сил.

При изложении динамики Пуассон исходит из основных ее принципов: сохранения движения центра тяжести, сохранения площадей и живых сил. Из последнего принципа он выводит положение о том, что при устройстве машин необходимо избегать явлений трения и удара тел.

Во второй том «Курса механики», переизданный в 1833 г., включена статья «О применении принципа живых сил к вычислению движения машины», в которой Пуассон рассматривает вопрос построения уравнения движения машины в общем виде. «Машины,— по его определению,— это приспособления или системы твердых тел,

предназначенные для переноса сил от одной части этих приспособлений к любой из иных частей».

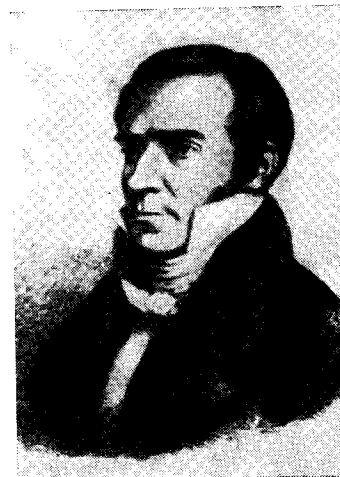
Курс механики Пуассона стал первым учебником механики, специально приспособленным для нужд высшей технической школы. Ряд вопросов статике и динамике в нем был разработан в виде, удобном для приложений и благодаря этому он оказался важным звеном в деле создания прикладной механики вообще.

Большое влияние на развитие механики машин в области динамики и кинематики оказали труды Пуансо.

Луи Пуансо (Louis Poisson, 1777—1859) родился в Париже, 19 лет окончил Политехническую школу, а в 1809 г. получил там кафедру анализа и механики. В 1813 г. был избран в Парижскую академию наук.

В 1803 г. вышла в свет книга Пуансо «Основы статике», в которой содержится одно из самых блестящих обобщений теоретической механики, заимствованное из нее впоследствии всеми прикладными ее ответвлениями, теория пар. Теория эта характерна для геометрического метода Пуансо, возникшего как реакция на аналитический метод Лагранжа и его школы и оказавшегося гораздо шире своего первоначального применения — статике твердого тела.

Понятие пары сил, введенное Пуансо, заключается в следующем: две равные силы, приложенные к одному и тому же твердому телу, действуют в противоположных направлениях, параллельных между собой. Назовем расстояние между этими направлениями плечом. Тогда произведение одной из сил на плечо и будет мерой действия пары сил. Понятие пары сил, тождественное с понятием момента, оказалось очень плодотворным, особенно в ряде практических приложений механики.



Л. Пуансо

Если к телу приложено несколько сил, то их всегда можно привести к одной паре и к одной равнодействующей, направленной перпендикулярно плоскости действия пары. Таким образом, совокупность результирующих сил и пары приводит к новому понятию — силового винта.

В мемуаре «Общая теория равновесия и движения систем» (1806) Пуансо распространил теорию кривых и построение нормалей к кривым на поверхности. До него над той же задачей работали Лопиталь, Лейбниц и Герман.

Мемуар Пуансо «Новая теория вращения тел» (1834) явился обобщением результатов, полученных ранее Эйлером и Коши. Эйлер ввел понятие момента инерции тела как меры сопротивления массы этого тела вращательному движению. Коши предложил понятие эллипсоида инерции, а Пуансо решил задачу о движении тела в общем виде. В начале мемуара Пуансо исследует все возможные движения твердого тела и приходит к заключению, что все они могут быть сведены к двум основным типам: к движению поступательному и вращательному. Далее, он устанавливает параллелизм, существующий между понятиями статики и кинематики (только что выделенной в отдельную отрасль механики): по его утверждению, следует только заменить в положениях статики понятия «сила», «пара сил» понятиями «скорость поступательного движения», «скорость вращательного движения» — и они будут преобразованы в положения кинематики. Таким образом, Пуансо, используя понятие силового винта, выведенное им в статике, доказывает теорему о том, что всякое движение твердого тела в пространстве сводится к вращению этого тела вокруг оси и поступательному движению в направлении последней.

Затем Пуансо рассматривает движение тела при одной закрепленной точке и движение тела по инерции вокруг нее. Особенно плодотворными для развития кинематики оказались теорема Пуансо о голонодах (всякое непрерывное движение фигуры в плоскости можно получить путем катания кривой, жестко связанной с данной фигурой, по другой, неподвижной кривой) и понятие аксоидов для общего случая пространственного движения.

Младшим современником Пуассона и Пуансо был Гаспар Густав де Кориолис (Gaspard Gustave de Coriolis, 1792—1843). Он родился в Париже и по окончании По-

литехнической школы учился в Школе мостов и дорог. В 1816 г. по предложению Коши поступил в Политехническую школу репетитором по математическому анализу и механике, а в 1838 г. был назначен директором учебной части школы. В 1836 г. был избран в Парижскую академию наук. Работал главным инженером Консерватории искусств и ремесел, профессором Школы мостов и дорог.

В 1829 г. Кориолис опубликовал работу «Вычисление действия машин», в 1844 г., после его смерти, она была переиздана под названием «Трактат о механике твердых тел и о вычислении действия машин». Это одно из первых сочинений, в которых методы теоретической механики были использованы в области теории машин.

Уже в середине 20-х годов XIX в. создание инженерной теории машин становится настоящей и очередной задачей, поставленной развивающимся машиностроением. Паровая машина, которая к этому времени начинает занимать все более и более значительное место в промышленности (а затем и в транспортной) энергетике, нуждается в теоретическом осмысливании как процессов преобразования тепла в механическую работу, так и кинематики и динамики ее механизма. Почти одновременно под вопросами динамики машин начали работать Понселе и Кориолис. Последний указывает в предисловии к своей книге: «Когда книга была уже написана, Понселе прислал мне литографированные лекции курса о машинах, читанные в школе в Метце, чем отнял у меня приоритет. Все же, мне кажется, что будет полезно собрать и представить в иной форме все рассуждения, которые относятся к такой важной науке, как теория машин».

Большое значение Кориолис придавал созданию терминологии. Он, в частности, ввел понятие работы, определив его как величину действия силы на некотором пути. Развитие этого понятия и составляет основное содержание теории машин Кориолиса.

Учение о составных частях машин Кориолис излагает следующим образом: «Большинство машин, предназначенных для какого-либо производства, имеют в своем составе три части, изучаемые в отдельности: 1. Часть, предназначенная для отбора наибольшего количества работы от источника, поставляющего ее и для преобразования этой работы в вид, пригодный для дальнейшей ее пере-

дачи. 2. Часть, предназначенная для передачи работы к орудию, цель которого — выполнение того полезного действия, которое желают получить от машины. 3. Наконец, само орудие».

Изучение части машины, целью которой является получение работы от первоисточника, относится в основном к динамике. Изучение части, предназначенной для передачи движения, является геометрической задачей, однако в отношении способов уменьшения трения и прочих препятствий, уменьшающих работу, оно принадлежит механике. Наконец, изучение орудий относится к технологии; обычно оно не связано с механикой.

Эти три части не имеют точных границ; не все машины имеют их, иногда они взаимосвязаны так, что в машине оказываются лишь две или даже одна часть; теоретически, однако, удобно различать их»¹⁶.

В работе рассматривается главным образом первая часть машины — двигатель или приемник. Кориолис исследует уравнение движения машины в общем и в нескольких частных случаях.

Кориолису принадлежит важный шаг вперед в создании теории маховика. В рассмотренной работе маховику посвящено лишь несколько замечаний, но изложены с достаточной полнотой основы приведения масс частей механизмов с постоянным соотношением скоростей к одному звену¹⁷. В 1832 г. он опубликовал в «Журнале Политехнической школы» мемуар¹⁸, специально посвященный важным вопросам динамики машин, в том числе теории маховика. В этом мемуаре Кориолис впервые применил графические методы к решению задач динамики машин; впервые же поставлена и решена задача о движении механизма под действием заданных сил. В работе исследуется коромысловая паровая машина. Кориолис находит здесь соотношения скоростей в шарнирах, затем на осно-

¹⁶ *Coriolis*. Du Calcul de l'effet des machines ou considérations sur l'emploi des moteurs et sur leur évaluation, pour servir d'introduction à l'étude spéciale des machines. Paris, 1829, p. 240.

¹⁷ Там же, с. 159—164.

¹⁸ *Coriolis*. Sur l'influence du moment d'inertie du balancier d'une machine à vapeur et de sa vitesse moyenne sur la régularité du mouvement de rotation que le va-et-vient du piston communique au volant. — «Journal de l'Ecole Polytechnique», 1832, t. 21, t. XIII, p. 228—267.

вании закона виртуальных скоростей он находит соотношения сил и строит диаграмму касательных усилий.

Кориолису принадлежит также известная теорема об абсолютном ускорении как о сумме трех составляющих: относительного, переносного и добавочного (кориолисова) ускорений¹⁹. Необходимо заметить все же, что в частных случаях эта теорема была высказана Эйлером и Клодо независимо друг от друга.

Целую эпоху в истории науки о машинах составили труды Понселе.

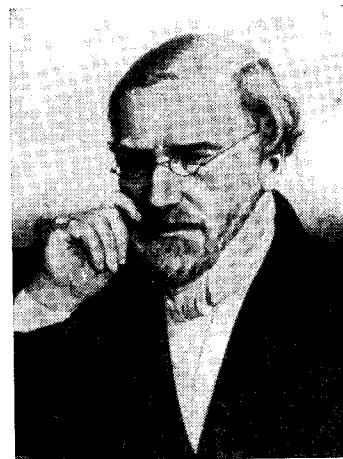
Жан Виктор Понселе (1788—1807) родился в Метце в семье адвоката. В 1807 г. он был принят в Политехническую школу седьмым по списку кандидатов. Учителями его были Прони, Пуассон, Монж, Аппетт, Лежандр, Фуриер и Андре. Из-за слабого здоровья, несмотря на выдающиеся способности, ученье давалось ему нелегко.

В 1810 г. Понселе окончил Политехническую школу и поступил в Инженерную школу в Метце (сюда была переведена Мезьерская школа), которую окончил в 1812 г. со степенью лейтенанта инженерных войск, и 17 июля был направлен в действующую армию Наполеона, которая вторглась тогда в Россию. Назначен был он в главный штаб инженерных войск; 18 ноября в сражении под Красным попал в плен, после чего был отправлен в Саратов.

В Саратове Понселе находился до июля 1814 г. и написал там свой знаменитый трактат о проективных свойствах фигур.

Вернувшись в 1814 г. во Францию, Понселе развивает интенсивную научную и педагогическую деятельность.

¹⁹ «Journal de l'Ecole Polytechnique», 1835, t. 24, p. 142—154.



Ж. В. Понселе

В 1824 г. он познакомился с Араго²⁰, который помог ему получить место профессора механики в Инженерной школе в Метце. Тогда же по совету Араго он начал заниматься прикладной механикой. Прочитанный им курс был первый раз издан литографированным способом и сразу же получил всеобщее признание. Издан он был в Метце в 1824 г.

Кроме своей основной работы Понселе зимой 1827/28 и 1828/29 гг. читал вечерние лекции по индустриальной механике для рабочих и ремесленников. Лекции эти были затем отлитографированы и розданы всем слушателям.

В 1834 г. Понселе был избран в Парижскую академию наук, где унаследовал место своего учителя Ашетта; в 1841 г. он был избран вице-президентом академии, а в 1842 г. — президентом. В 1848 г. бригадный генерал Понселе был назначен командующим Политехнической школой. Он много занимался современной техникой: по заданию Академии наук он написал свыше 60 отзывов на различные изобретения. В 1857 г. после Международной выставки в Лондоне и пользуясь ее материалами Понселе издал двухтомный «Отчет о машинах и инструментах, применяемых на производстве», содержащий интересный материал о технике середины XIX в.

Понселе является одним из создателей механики машин, в особенности той ее части, которая трактует динамику машин. Однако, по словам самого Понселе, он принялся за составление курса о работе машин если и не с отвращением, то по крайней мере с глубоким чувством сожаления и по личному распоряжению военного министра. Он считал себя совершенно не подготовленным к этой работе, тем более что его основные научные интересы находились в стороне от вопросов прикладной механики. Но за порученное ему дело он принялся серьезно и посетил ряд заводов в Рошфоре, Ангюлеме, Сент-Этьенне, Страсбурге и в других местах, где и собрал материалы для своего курса. Одновременно начинается и исследовательская его работа в области прикладной

механики: в 1825 г. он опубликовал «Мемуар о вертикальных гидравлических колесах с искривленными лопатками», в котором предложил новый тип лопаток колес; мемуар этот был премирован Парижской академией наук. Это направление Понселе развивает и далее: в 1838 г. он разработал теоретические основы расчета турбин.

Как было указано выше, первой работой Понселе по общей теории машин был «Курс механики в приложении к машинам». В этой работе еще очень заметно влияние основоположников науки, в частности Борньи. Курс разделен на три неравные части: третья часть по своему объему равна двум первым. В первой части Понселе занимается общими законами движения машин; объект изучения он определяет так: «Машины, рассматриваемые с промышленной точки зрения, имеют своей задачей выполнение определенных производственных работ при помощи двигателей или же движущих сил, доставляемых природой; таковыми являются животные, ветер, вода, тепло».

Основное содержание первой части составляет вывод уравнений живых сил в применении к машинам в общем и в некоторых частных случаях. Характерным для Понселе являются стремление к точности и ясности в выражениях. Вводя новые обозначения, он тщательно поясняет их, зачастую указывает на терминологию, применяемую другими авторами, пытается установить единообразие в терминах.

Вторая часть книги озаглавлена «Об основных способах регулирования действия сил в машинах и обеспечения равномерности движения». Здесь Понселе рассматривает передачу и преобразование движений в машинах, используя соответствующие главы сочинения Борньи. Однако между Понселе и Борньи имеется существенное различие, хотя между публикацией обоих курсов прошло всего около восьми лет. Борньи провел свое исследование, исходя в основном из машинной техники XVIII в., Понселе же пользуется современной ему техникой конца первой четверти XIX в.

Отдельные статьи второй части посвящены теории передаточных механизмов. Здесь Понселе отходит от школы Монжа: он не удовлетворяется описанием отдельных механизмов, а группирует их по некоторым общим чертам, причем делает это и с педагогической точки зре-

²⁰ Доминик Франсуа Араго (Dominique François Arago, 1786—1853) — знаменитый физик, профессор Политехнической школы и член Парижской академии наук. Долгое время был непременным секретарем академии. Оказал большое влияние на развитие французской науки.

ния — для облегчения изучения и с исследовательской точки зрения — отыскивая наиболее удобную систематику механизмов и машин. Так, рассматривая вопрос о передаче вращения между двумя параллельными валами, он указывает, что такую задачу можно решить с помощью фрикционной передачи, передачи с гибким звеном и зубчатых колес. При этом он излагает элементарную теорию зубчатого зацепления.

В третьей части книги Понселе излагает учение о полезных и вредных сопротивлениях и моментах инерции тел.

«Индустриальная механика», изданная в 1839 г., значительно отличается от литографированных лекций как по объему, так и по содержанию. Она состоит из трех частей: первая посвящена вводным замечаниям, вторая — общим вопросам статики и динамики, а третья — теории машин и двигателей. Основные обозначения и понятия изложены в первой части (в частности, § 44—45²¹ посвящены выяснению понятия работы).

Вторая часть содержит краткий курс теоретической механики, изложенный на основе техники и с техническими примерами очень элементарно и с большим педагогическим мастерством. Каждое новое понятие Понселе рассматривает с разных точек зрения, приводит примеры и добивается того, что чтение курса оказывается доступно и лицам с элементарной математической подготовкой. В этом сказалась реакция деятелей французского технического образования против математизации механики Лагранжем: геометры Пуансо и Понселе обращают больше внимания на создание образов, чем на математические их модели.

Особенно большое внимание во второй части уделяется теории вращения твердого тела вокруг оси, центробежной силе и вредным сопротивлениям в машинах. Силу инерции Понселе определяет как противодействие ускоряемого тела, приложенное к ускоряющему.

Понятие механической работы является основным содержанием книги: оно рассматривается в первой и во второй частях; от понятия работы Понселе переходит к

исследованию живой силы и уравниванию живых сил для машины. Это же понятие и его значение для исследования машин развивается и в третьей части книги: здесь автор (в первой главе) резюмирует принципы, на основании которых строит учение о машинах. Из этих принципов 1-й определяет понятие силы, 2—5-й — работу силы на некотором пути, 6-й — величину и направление силы инерции, 7—9-й — живую силу для поступательного, вращательного и общего случаев движения тела, 10—14-й — живую силу тела для конечного и бесконечно малого промежутка времени и системы тел.

Как это и следует из принципов Понселе, основной задачей машины он считает преобразование работы. Здесь могут быть два предельных случая: передача незначительных сил и передача больших мощностей. В первом случае механизм передачи имеет небольшое значение, во втором подчиняется жестким условиям и составляет предмет учения о передаче. Что касается двух других составляющих машины — приемника или двигателя и орудия, то они пугаются в дополнительном исследовании; об орудии вообще трудно что-либо сказать ввиду крайнего разнообразия орудий.

Понселе не разделяет исследование машины на кинематическое и динамическое, тем более что с кинематикой в те годы не все еще было выяснено. Не было выяснено, например, такое важнейшее понятие кинематики, как понятие ускорения; сделал это сам Понселе в 1841 г. С другой стороны, не выделилось еще и учение о деталях машин, поэтому Понселе в своем курсе наряду с модераторами, регулятором и маховиком рассматривает приложение сопротивления материалов к расчету машинных деталей, гидравлику, расчет гидравлических двигателей, теорию паровой машины и теорию живых двигателей, которые все еще составляли важную часть энергетического баланса страны.

Несмотря на прогрессивность своего исследования, Понселе не всегда последователен. Например, при рассуждении о простых машинах он сообщает, что они называются так, «ибо всякая машина состоит из одной или системы нескольких простых машин»²².

²¹ J.-V. Poncelet. *Mécanique industrielle, exposant les principes de statique et de dynamique, les organes mécaniques et les moteurs*. Bruxelles, 1839, p. 31—33.

²² Poncelet. *Mécanique industrielle...*, p. 156.

Отдельный параграф третьей части посвящен теории и установке маховиков²³; параграф содержит вычисление живой силы маховика и его веса.

Не лишены интереса условия вычерчивания зубчатых зацеплений. Как пишет Понселе, «черчение зацеплений подчинено следующим условиям: 1. Зубья одного колеса должны быть равны между собой. 2. Промежутки между зубьями должны быть одинаковыми на обоих колесах. 3. Внешняя форма зубьев должна быть симметрической по отношению к средней линии каждого из них. 4. Зубья не должны нажимать друг на друга, прежде чем не придут на линию центров... 5. Наконец, чтобы кривые, по которым зубья соприкасаются или ведутся, были вычерчены так, чтобы колеса приводили друг друга со скоростями, постоянно остающимися в одном и том же отношении, в том, которое имело бы место для начальных окружностей, если бы они приводились во вращение простым соприкосновением»²⁴.

В третьем издании книга Понселе вышла в 1845 г. под названием «Курс механики в приложении к машинам». План ее по сравнению с изданием 1839 г. несколько изменен. Она состоит из восьми частей: общие принципы механики машин, прикладная кинематика, сопротивления, возникающие во время работы машин, гидравлика, теория зацеплений, явление удара в машинах, теория двигателей, излагаемая на основе принципа живых сил, основы теории подъемных мостов (последняя часть сочинения выпадает из его плана, но она посвящена вопросу, особенно интересовавшему инженеров того времени).

В основу исследования Понселе кладет понятие работы, которое он определяет как $\int Qdq$, где Q — сила, измеряемая в килограммах, а q — путь, измеряемый в метрах. После элементарного ознакомления с принципами механики Понселе выводит общее уравнение движения машины

$$\Sigma mv^2 - \Sigma mv'^2 = 2\Sigma Fdf - 2\Sigma Rdr - 2\Sigma Qdq \pm 2\Sigma mgdh,$$

где Fdf — работа движущих сил, Rdr — работа сил вредного сопротивления, Qdq — работа сил полезного сопро-

тивления, $mgdh$ — работа сил веса движущихся частей машины.

Переходя к вопросу о регулировании хода машин, Понселе указывает на следующие пять способов регулирования хода и уравнивания машин.

1. Зубчатой передачей. Вращательное движение передается от одного тела к другому с постоянным отношением скоростей.

2. Точным центрированием осей вращающихся деталей для уменьшения действия центробежных сил и сплинения давления на оси.

3. Статическим уравниванием деталей с возвратно-поступательным движением.

4. Уменьшением в возможных пределах веса, скорости, а также проходимых путей для деталей, участвующих в возвратно-поступательном движении.

5. Воздействием в некоторых частных случаях на двигатель и на полезное сопротивление.

В качестве наиболее общего способа регулирования скорости движения машины Понселе предлагает применение маховика и выводит уравнение его движения. Им было предложено выражение для коэффициента неравномерности

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{ср}}}.$$

В сущности Понселе разработал все предпосылки для создания метода касательных усилий. Он, следуя Карно, указал на необходимость учета влияния сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс машины на равномерность ее вращения

$$(I_{\max} + I_1) \omega_{\max}^2 - (I_{\max} + I_2) \omega_{\min}^2 = 2A,$$

где A — величина избыточной работы. Он разработал на основе теоремы Шаля и принципа возможных перемещений способ определения касательной приведенной силы и графический метод определения избыточной силы. В развитие метода Кориолиса он предложил, таким образом, графоаналитический метод определения изменения угловой скорости кривошипа и, следуя Уатту и Навье, вывел формулу для расчета веса обода маховика²⁵.

²³ Poncelet. Mécanique industrielle..., с. 359—372.

²⁴ Там же, р. 374.

²⁵ Poncelet. Traité de mécanique appliquée aux machines, t. 1. Liège, 1845, p. 102—153.

Отдельная глава посвящена теории модераторов (пользуясь терминологией Борнби), «специальным назначением которых является противодействие любому увеличению скорости движения машины, которое могло бы отрицательно повлиять на работу машины или стать для нее опасным». К модераторам Понселе относит тормоза, парашюты, маховики с лопастями, которые, ударяясь о воздух, увеличивают сопротивление пропорционально скорости вращения. Применение модераторов этого типа должно быть ограниченным, так как они забирают на себя большое количество работы и таким образом снижают полезную отдачу машины.

Все статьи в «Курсе механики» сопровождаются численными примерами и расчетами.

Отдельный раздел книги посвящен теории передаточных механизмов. Сюда Понселе включил теорию зацеплений, теорию фрикционной передачи, передачу гибкими звеньями, кулачковые механизмы, теорию шарнира Гука. Излагая теорию зубчатых зацеплений, он исходит из положения о том, что форма зубьев должна обеспечить качение без скольжения начальных цилиндров колес друг по другу; при этом отношение угловых скоростей должно равняться постоянному числу. Далее Понселе излагает теорию профилирования зубьев колес по циклоидальным кривым и по эвольвенте, а также приближенные методы вычерчивания зубьев. Продолжительность зацепления он не рассчитывает, ограничиваясь указанием на то, что в зацеплении должны участвовать всегда два зуба. В параграфе о коническом зацеплении он описывает приближенный метод построения конического зацепления способом дополнительных конусов; здесь же сообщает некоторые сведения о конструктивном выполнении зубчатых колес и других деталей, так как прикладная или индустриальная механика была в то время единственной теоретической наукой об основах машиностроения.

Теорию кулачковых механизмов Понселе дает только в описательном изложении.

Еще в своей работе 1824 г. Понселе ввел понятие силы инерции, понимая под этим противодействие ускоряемого тела, приложенное к ускоряющему. В 1845 г. математик Дюамель²⁶ в своем «Курсе механики» повторил это

²⁶ Жан Мари Констан Дюамель (Jean-Marie Constant Duhamel,

определение. Так называемое уравнение Даламбера в его современной форме было предложено Делоне²⁷, который ввел условную операцию приложения силы инерции данной материальной точки к той же точке. Однако и он указывает на то, что действительная сила инерции приложена к телу, которое сообщает ускорение данному.

Ряд вопросов динамики машин был разработан также в курсе прикладной механики Морена²⁸. В частности, им были разработаны способ построения диаграммы касательных сил и способ приближенного расчета маховика²⁹. Морен использовал графические методы Кориолиса и Понселе, однако не принял во внимание указания этих ученых относительно необходимости учета влияния возмущенно-поступательно движущихся масс на равномерность движения машины. Но он предложил и одно улучшение метода; указал на влияние конечности длины шатуна.

Таким образом, к середине 40-х годов XIX в. была создана теория машин как приложение динамики к машинам. Были выяснены важные вопросы теории движения машины, выяснена роль сил инерции в машинах, заложены основы теории регулирования и создан достаточно действенный метод графоаналитического расчета маховика. Это уже было немало. Во второй четверти века паровая машина, получившая незадолго до этого функцию универсального транспортного двигателя, потребовала серьезных конструктивных усовершенствований, чего теперь, без создания теории, сделать уже было нельзя.

1797—1872) в 1816 г. поступил в Политехническую школу, которую не закончил. С 1834 г. профессор Политехнической школы и Сорбонны. С 1840 г. — член Парижской академии наук (избран на место Пуассона). Работал в области математики, механики и математической физики. «Курс механики» (1845—1846), «Методы в науках рассуждения» (1866—1872).

²⁷ Шарль Эжен Делоне (Charles-Eugène Delaunay, 1816—1872) — математик и астроном. Окончил Политехническую и Горную школы. Профессор геодезии и математики Политехнической и Горной школ. С 1870 г. — директор Парижской обсерватории.

²⁸ Артур Жюль Морен (Arture-Jules Morin, 1795—1880) окончил Политехническую школу, а затем Инженерную школу в Метце, получил звание инженера саперной службы. С 1819 г. читал в Метце курс приложения механики к машинам. С 1839 г. — профессор Консерватории искусств и ремесел. После смерти Кориолиса был избран на его место в Академию наук (1843).

²⁹ А. Морин. Leçons de mécanique pratique, p. 3. Paris, 1846, p. 312—368.

Интересно, что еще в 1826 г. один из важнейших парламентариев выговаривал Стефенсону: «Каждая часть представленного вами проекта показывает, что вы ничего не понимаете. Можно ли поверить, что мы сможем галопировать со скоростью двенадцати миль в час с помощью дьявола, который в качестве почтальона на передней лошади примет вид локомотива. Я считаю, что локомотив не сделает и шести миль. Практически и для всех полезных надобностей едва ли он побегит скорее четырех миль. Ветер будет на вас дуть, каждый свежий ветерок будет тормозить локомотив — он или будет мешать огню в топке, или задержит пар, пока не взорвется котел. Дождь размоет путь, а снег полностью приостановит движение». Подобные «предсказания» по разным поводам высказывались и до этого, и позже, как, вероятно, и впредь будут высказываться. Однако это не задержало строительства дорог, и уже к середине 40-х годов проблема сил инерции и их действия на подвижной состав железных дорог оказалась одной из важнейших.

В этом направлении работали горный инженер Лепателье³⁰ и астроном Вильярсо³¹. Первый из этих ученых дал элементарную теорию сил инерции в форме, приемлемой для технических применений и сам воспользовался ею при расчете устойчивости локомотивов в движении. Вильярсо, работая в том же направлении, определил силы инерции механизма паровой машины локомотива, решив, таким образом, одну из важнейших задач динамики машин.

В те же годы были решены некоторые важные задачи кинематики механизмов, главным образом те, которые име-

ли геометрическое содержание и которые, пользуясь современной терминологией, следовало бы отнести к кинематической геометрии.

Все французские ученые, работавшие в этом направлении, были в той или иной степени связаны с Политехнической школой. Феликсу Савари³² принадлежит теорема о связи между радиусами кривизны взаимоигибаемых кривых и центроид в форме

$$\left(\frac{1}{\rho_1 + r} + \frac{1}{\rho_2 + r} \right) \cos \varphi = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Он обобщил результаты, полученные Эйлером еще в 1765 г.

Бобилье³³ написал мемуар о геометрических законах движения, результаты которого были опубликованы в 10-м издании его «Курса геометрии», и вывел следующие положения.

1. Любое движение треугольника в его плоскости можно воспроизвести качением некоторой линии по другой закрепленной линии.

2. Если две стороны треугольника скользят по двум окружностям, то и третья сторона также будет скользить по окружности; центры всех трех окружностей определяют четвертую окружность, являющуюся геометрическим местом мгновенных центров вращения движущейся фигуры.

Коши³⁴ исследовал бесконечно малые движения неизменяемой фигуры на плоскости и в пространстве. В 1827 г.

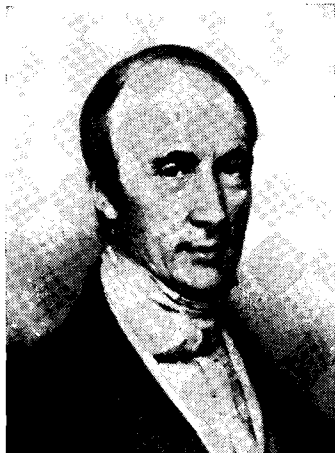
³⁰ Луи Лепателье (Louis Le Chatelier, 1815—1873). Окончил Политехническую и Горную школы. Работал сперва горным инженером, затем инженером путей сообщения. Ряд исследований посвятил теории локомотивов. В частности, в работе «Очерки об устойчивости машин локомотивов при их работе» (1849) изучил влияние сил инерции.

³¹ А. Ж. Ф. Ивон-Вильярсо (A. J. F. Yvon-Villarceau, 1813—1889). Учился в консерватории, но, увлекшись сен-симонизмом, не окончил ее и уехал в Египет. В 1837 г. вернулся во Францию и поступил в Центральную школу искусств и ремесел. С 1846 г. работал в качестве астронома в Парижской обсерватории. Исследование сил инерции кривошипно-шатунного механизма изложено им в работе «Теория устойчивости машин локомотивов при их работе» (1851).

³² Феликс Савари (Felix Savary, 1797—1841) по окончании Политехнической школы был назначен профессором по курсу геодезии и построения машин. Курс построения машин Савари получил от Араго; после него курс этот в Политехнической школе читал Шаль. Слабое здоровье не дало Савари возможности полностью использовать свои блестящие способности.

³³ Е. Бобилье (E. Bobilier, 1797—1832) — математик; был профессором и директором Школы искусств и ремесел в Шалоне. Работал в области геометрии — дифференциальной и кинематической (указанное издание его работы: *E. Bobilier. Cours de géométrie*, 10-е ed. Paris, 1950).

³⁴ Огюстен Луи Коши (Augustin-Louis Cauchy, 1789—1857) — выдающийся математик. Окончил Политехническую школу (1807) и Школу мостов и дорог (1810), работал инженером путей сообщения в Шербурге, с 1813 г. преподавал в Политехнической школе, в Сорбонне, в Коллеж де Франс. Член Парижской академии наук (1816).



О. Коши

он сформулировал теорему о мгновенной оси вращения тела, испытывающего бесконечно малое перемещение в пространстве: каково бы ни было происхождение движения твердого тела в пространстве, отношения, существующие между различными точками, будут такими, как если бы тело могло вращаться вокруг неподвижной оси и скользить вдоль нее. Он доказал также, что при перемещении в плоскости плоской фигуры перемещение это можно получить, связывая фигуру с кривой, которая катится по другой кривой³⁵.

Теодор Оливье³⁶ работал в области начертательной геометрии и занимался исследованием движения фигур в пространстве. Им была разработана геометрическая теория зацепления. В качестве общего способа получения зацеплений любого вида Оливье предложил метод огибающих поверхностей. Он доказал возможность существования как скользящих, так и катящихся систем при любом расположении осей вращения. Все свои исследования Оливье проводил геометрическим методом.

Наибольшая заслуга Оливье состоит в том, что он развил теорию пространственных зацеплений³⁷. До него большинство исследователей ограничивались или зацепле-

нием на плоскости, или зацеплением на сфере. Оливье указал на различие между линейчатым и точечным зацеплением. Одновременно он исследовал несколько типов пространственных зацеплений, впервые предложенных им самим, или таких, которые он первый исследовал. Он указал также, что можно построить зацепление с постоянным передаточным отношением, причем трение между зацепляющимися поверхностями в этом случае будет трением качения. Впервые зацепления такого типа (цилиндрические и конические) были построены Уайтом. Как указал Шаль, «Оливье в мемуаре, представленном Академии наук 5 ноября 1825 г., впервые доказал, что зацепление Уайта не имеет трения скольжения, как это имеет место в обычных зацеплениях, но лишь трение качения. Известно, что Уайт объявил об этом свойстве, но не доказал его (1810).

В другом мемуаре, представленном также в Академию наук в декабре 1825 г., Оливье исследует общий вид зацеплений, в которых оси обоих зубчатых колес не находятся в одной плоскости и которые, подобно зацеплению Уайта, имеют лишь трение качения. Автор привел несколько решений этой задачи»³⁸.

Важные исследования в области теоретической кинематики и кинематической геометрии выполнил выдающийся французский геометр и историк науки Мишель Шаль (Michel Chasles, 1793—1880). Он по окончании лицея учился в Политехнической школе, затем поселился в Шартре, где занялся банковской деятельностью. В 1837 г. он опубликовал свою работу по истории геометрии («Aperçu historique sur l'origine et le développement des méthodes de la géométrie»), которая в 1883 г. была переведена на русский язык.

В 1841 г. Шаль был приглашен на кафедру построения машин. В 1846 г. он занял кафедру высшей геометрии в Сорбонне, созданную специально для него. С этого времени он становится руководителем французских геометров, развивая во Франции новое для них направление синтетической проективной геометрии. Он в значительной степени развил направление кинематической геометрии, которое попало в его поле зрения в связи с курсом построения машин.

³⁸ M. Chasles. Rapport sur le progrès de la géométrie. Paris, 1870, p. 68—69.

³⁵ «Sur les mouvements que peut prendre un système invariable libre ou assujéti à certains conditions (1827). — Oeuvres complètes de A. Cauchy», 2-е série, t. VII, p. 101.

³⁶ Теодор Оливье (Theodor Olivier, 1793—1858) по окончании Политехнической школы в 1821 г. был приглашен в Швецию для участия в организации политехнической школы. Некоторое время преподавал в военной академии. По возвращении во Францию принимал деятельное участие в организации Парижской центральной школы искусств и ремесел. В 1830 г. получил в Консерватории искусств и ремесел профессору по начертательной геометрии.

³⁷ T. Olivier. Théorie géométrique des engrenages... Paris, 1842.

В 1851 г. Шаль был избран в Парижскую академию наук. Он был членом многих иностранных академий, в том числе членом-корреспондентом, а затем почетным членом Петербургской академии наук.

В своих историко-научных исследованиях Шаль развил тезис о преимуществах научных идей, чем противопоставил себя некоторым ученым (в том числе и Понселе). Уже в преклонном возрасте, в 1870 г., Шаль в рядах национальной гвардии защищал Париж от наступающих прусских войск.

В своем «Курсе машин» Шаль определяет машину следующим образом: «Под именем машин вообще описывают такие аппараты, предметом которых является производить на некое сопротивление, расположенное в заданной точке, действие, произведенное двигателем, приложенным к другой точке, иначе говоря, передавать некоторому заданному телу движение, сообщенное другому телу...

Машины следует рассматривать с двух основных точек зрения: геометрической и механической. Первая касается структуры машины, абстрагируясь от движущих сил (приводящих в движение и сопротивляющихся), которые развиваются в ней. Здесь рассматриваются лишь перемещения, соответствующие различным частям машины, и геометрические отношения, имеющие место между этими перемещениями, вследствие связей и взаимозависимостей, которые сохраняют между собой части машины...»³⁹. Впервые кинематическая сущность машины была подчеркнута с такой ясностью. Это желание проникнуть в геометрию машины отражается и на содержании всего курса, в котором значительная часть посвящена «органам машин» — механизмам.

В ряде теорем, частично опубликованных еще в «банковский» период его деятельности, Шаль привел в порядок основания кинематической геометрии. Так, в 1830 г. он определил основные геометрические свойства перемещений систем, остающихся подобными самим себе в процессе движения. Для двух произвольно расположенных в пространстве тел существует некоторая прямая, такая, что одно из тел можно повернуть вокруг нее для размещения его подобным образом относительно другого. Для двух подобных

многоугольников, расположенных в одной плоскости, всегда существует в плоскости точка, отношение расстояний которой до соответствующих вершин этих многоугольников постоянно и равно отношению сходственных сторон. Если повернуть один из многоугольников вокруг этой точки на определенный угол, то точка окажется центром подобия по отношению к обоим многоугольникам. Если на плоскости расположены произвольным образом два равных многоугольника, то всегда существует в плоскости точка, одинаково удаленная от соответствующих вершин этих многоугольников. На основании этих положений Шаль разработал метод построения нормалей к механически воспроизводимым кривым.

Для двух положений тела в пространстве Шаль сформулировал следующую теорему: тело можно перевести из одного положения в другое одним винтовым движением. Таким образом, винтовое движение является наиболее общим пространственным движением тела.

В 1827 г. Коши доказал, что перемещение фигуры в плоскости может быть получено с помощью катания кривой, связанной с фигурой, по неподвижной кривой, связанной с плоскостью. В 1837 г. Шаль обобщил эту теорему и дал метод построения мгновенных центров вращения для движущихся фигур. Метод этот дал возможность определить радиусы кривизны целого ряда механических кривых.

Некоторые вопросы пространственной кинематики решил Родриг⁴⁰. Ему, в частности, принадлежит решение задачи относительно нахождения равнодействующего движения двух конечных последовательных вращений в пространстве около двух пересекающихся осей. Родриг высказал также свойство сопряженных вращений возле осей непересекающихся и непараллельных при конечном движении неизмеряемой системы в пространстве.

В 1845 г. Шаль исследовал ряд геометрических свойств бесконечно малого движения свободного тела в простран-

³⁹ Бенжамен Олинде Родриг (Benjamin-Olinde Rodrigues, 1794—1851) — французский математик и экономист. Окончил Нормальную школу, был репетитором по математике в Политехнической школе. Ближайший ученик и последователь Сен-Симона. В области математики он изучал линии кривизны (формула Родрига, 1816) и ввел в теорию поверхностей сферическое представление.

³⁹ M. Chasles. Cours des machines. Paris, 1847, p. 1—2 (литографированное издание Политехнической школы).

стве. Шаль ввел при этом понятие фокуса плоскости, характеристики плоскости и сопряженных прямых.

Горный инженер, репетитор Политехнической школы Абель Трансон (1805—1876) развил некоторые идеи Савари и Шалья. Так, в 1844 г. он предложил построение центра кривизны в любой точке эллипса; в 1845 г. им был предложен новый метод для определения радиуса кривизны траектории движущейся точки. Он ввел понятие круга качения⁴¹.

Итак, к 40-м годам XIX в. французские ученые добились весьма существенных результатов в деле создания науки о машинах. Но к этому времени на сцену выходят и ученые Англии и Средней Европы, которые в первой четверти века оставались на втором плане, в определенной степени повторяя или перефразируя работы французских ученых. Теперь важные работы в области механики машин появляются и в Англии, и в Германии, и в Чехии.

Мы видели, что еще в XVIII в. все главные европейские державы начали развивать школьный способ подготовки инженерно-технических кадров. В XIX в. этот процесс продолжается.

Иначе обстояло дело в Англии. Англия давно уже не вела войн на Европейском материке, если не считать вылазки Веллингтона в 1814 г., и кадры военных инженеров главной задачей которых было проведение фортификационных работ, нужны ей не были. Требования же горного дела удовлетворялись работой инженеров, хорошо изучивших на практике ведение горного хозяйства. То же самое можно сказать относительно строителей и архитекторов и теперь, когда возникла новая, машиностроительная отрасль промышленности; она тоже не стимулировала создания высшей технической школы. Все инженеры, создавшие славу английскому машиностроению, Уатт и Мэрдок, Брама, Модсли, Смитон, Витворт и многие другие, были практиками. Правда, в начале XIX в. в некоторых университетах и в Вульвичской военной академии вводились курсы по некоторым техническим дисциплинам, а несколько позже основывались и соответствующие кафедры, но это было лишь исключением из правила. Да и биографии

первых английских машиноведов подтверждают то же правило, ибо их основной университетской специальностью были богословие, философия и в лучшем случае естественные науки. Только в 1841 г. в лондонском университетском колледже были основаны три технические кафедры: по гражданскому строительству, по механике и по машиностроению; несколько позже эта практика была воспринята и другими английскими университетами. Однако вопрос об открытии специальных высших технических учебных заведений все еще продолжал дискутироваться и был разрешен только во второй половине века, когда Англия начала терять свое техническое первенство. Еще в 1851 г. на первой Всемирной выставке английская промышленность получила от жюри большинство медалей за свои изделия, но на Парижской выставке 1867 г. она с трудом смогла заносить немногим более десяти медалей. Отставание в подготовке инженерных кадров было, таким образом, доказано самой практикой.

Первые английские ученые, занимавшиеся вопросами прикладной механики, интересовались главным образом статикой и поведением строительных (и машиностроительных) материалов. К их числу относились Джон Робисон (John Robyson, 1739—1805) — один из основателей Британской энциклопедии, профессор физики в Глазго и Эдинбурге, автор «Основ механической философии» (1804), оказавший значительное влияние на Уатта; Чарльз Хаттон (Charles Hutton, 1737—1823) — профессор математики в Военной академии в Вульвиче, член Королевского общества и его секретарь, написавший трехтомный «Трактат о математических и философских предметах» (1812), и самый известный из них — Томас Юнг (Thomas Young, 1773—1829) — доктор медицины Гёттингенского университета (1796), практический врач, член Королевского общества (1802), физик, философ, механик, филолог, профессор натурфилософии и автор двухтомного «Курса лекций по философии природы и по механическим искусствам» (1807), во втором томе которого (§ 319) содержится определение модуля упругости («модуля Юнга»). Но английские инженеры-практики (ровно, как и их французские коллеги) не особенно интересовались теорией. Так, виднейший английский мостостроитель и гражданский инженер Тельфорд (1757—1834) весьма недоброжелательно отнесся к теории. Как сообщает о нем профессор Кем-

⁴¹ A. Transon. Méthode géométrique pour les rayons de courbure d'une certaine classe des courbes. — «Journal de Mathématique pure et appliquée», 1845, v. 10, s. 1, p. 140—157.

бриджского университета Д. Брюстер, Тельфорд «питал необычайное отвращение к математическим занятиям и не изучил даже элементов геометрии; эта странность дошла до того, что, когда нам случилось рекомендовать одного нашего юного друга для поступления в его проектное бюро, причем мы обосновали нашу рекомендацию тем, что наш кандидат был отличным математиком, Тельфорд без колебаний заявил, что подобные познания скорее дисквалифицируют кандидата, чем подтверждают его пригодность для занятия подобной должности»⁴².

Если не учитывать тех сочинений, основным содержанием которых было описание различных машин и теоретический уровень соответствовал науке первой половины XVIII в., а также перевода сочинения Ланца и Бетанкура, то первой работой, содержавшей некоторые теоретические обобщения, из числа английских научных публикаций начала XIX в. можно считать «Трактат о теоретической, практической и описательной механике» Олинтеса Грегори⁴³, изданный в Лондоне в 1815 г. В первом томе трактата содержится краткий обзор сведений из теоретической механики; во втором, «содержащем замечания о порядке, конструкции и упрощении машин, о трении, сопротивлении канатов, о первичных двигателях и т. д., а также описание многих интересных и полезных машин», изложены вопросы прикладной механики. Второй том подразделяется на две части: первая — краткий курс прикладной механики (около 80 с.), содержащий основы теории механизмов по Монжу и некоторые разделы из теории машин; вторая — нечто вроде краткой технической энциклопедии, в которой статьи о машинах помещены в алфавитном порядке. Курс Грегори очень краткий: для его составления автор использовал в основном работы французских ученых. Части книги не связаны общей идеей и представляют собой скорее более или менее популярные статьи на разные темы, чем главы научной монографии. Автор пользуется классификационной системой Монжа и в то же время сводит состав машин к совокупности «прос-

тых машин». «Машины применяются, — пишет Грегори, — главным образом в трех случаях:

1. Для приспособления направления движущей силы к направлению сопротивления, которое следует преодолеть.

2. Для того чтобы действие, имеющее постоянную определенную скорость, могло выполнить работу с иной скоростью.

3. Для того чтобы некоторая природная сила, имеющая определенную интенсивность, могла уравновесить или преодолеть другую силу или сопротивление с большей интенсивностью.

Сложные машины являются специфическими комбинациями следующих шести: рычага, блока, ворота, наклонной плоскости, клина и винта»⁴⁴.

К работе приложена таблица «элементарных машин» Аристотеля, книгу которого автор настоятельно рекомендует для изучения. Грегори не замечает явного противоречия, которое существует между обоими этими положениями, и может быть, просто считает его несущественным. Не затрагивая он и многих вопросов науки о машинах, уже разработанных его современниками. Так, в общих рассуждениях о машине он указывает, что «самой совершенной машиной является та, которая работает с наименьшим количеством движущихся частей». Высказав эту мысль, он не стремится обосновать ее или подвергнуть дальнейшему исследованию.

Значительный интерес представляет краткий словарь по машиноведению: он состоит из статей об отдельных машинах, биографических сведений об изобретателях, сообщений о новых изобретениях с описаниями последних. Особенно хорошо освещены в ней усовершенствования паровой машины. Есть также ряд статей исторического содержания; в частности, приводится полный текст «Столетия изобретений» маркиза Ворчестера.

Заметный след в истории мировой науки оставил Чарльз Беббидж (Charles Babbage, 1792—1871) — профессор математики Кембриджского университета, член Королевского общества, изобретатель и экономист. Целью его жизни было создание счетной машины: над этим делом он

⁴² Цит. по кн.: С. П. Тимошенко. История науки о сопротивлении материалов. М., 1957, с. 93, примеч. 1.

⁴³ Олинтес Грегори (Olinthes Gregory, 1774—1841). В 1793 г. по окончании средней школы, издал свою первую работу «Уроки астрономические и физические». С 1802 г. — профессор математики в Вульвичской военной академии

⁴⁴ O. Gregory. A treatise of mechanics theoretical, practical and descriptive, v. I. London, 1815, p. 379.

трудился 37 лет, не добившись окончательного результата. Но его идеи, опубликованные в ряде книг и статей, и его практическая и общественная деятельность способствовали развитию английского машиностроения. В 1831 г. благодаря Беббиджу была организована Британская ассоциация для распространения наук. В 1832 г. он опубликовал свой главный труд по экономике машиностроения⁴⁵, основанный на изучении европейского фабрично-заводского производства. В 1834 г. Беббидж организовал в Англии Статистическое общество. И это далеко не все из того, что он сделал!

В истории механизации счета работы Беббиджа выпадают из общей линии развития счетных машин: он создавал не счетную, а вычислительную машину, причем пробовал построить ее, пользуясь лишь известными тогда механизмами. Трагедия его заключалась в том, что тогда не ощущалось особенной нужды в вычислительной технике, и вычислители, астрономы, геодезисты и математики справлялись со своими вычислениями без помощи машин.

Беббидж работал над двумя типами машин. Более простая разностная машина (Difference Engine) была им в конце концов построена. Несколько позже он начал работать над созданием аналитической машины, основанной на совершенно ином принципе: она представляла собой вычислительную машину в современном смысле слова. Он начал работать над ней в 1833 г., во время перерыва в работе над разностной машиной, и работал до самой смерти.

Из немногих лиц, которые поняли сущность и величие изобретения Беббиджа, следует указать на Аду Байрон графиню Ловлейс (Augusta Ada Byron, countess of Lovelace, 1815—1852) — дочь Байрона, которая написала ряд комментариев к работе Беббиджа и была, если пользоваться современной терминологией, первым программистом в истории вычислительных машин.

Беббиджу принадлежит также одна из первых систем условных знаков для записи операций механики машин⁴⁶. В этой системе каждому звену механизма присваивается определенный знак; род движения, в котором принимает

⁴⁵ *Ch. Babbage. On the Economy of Machinery and Manufactures. London, 1832.*

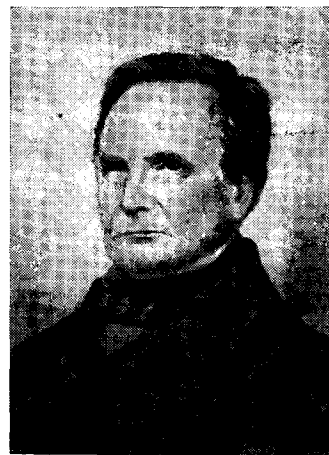
⁴⁶ Впервые опубликована в 1826 г. в статье, напечатанной в журнале «Philosophical Transactions» — Более полно изложена в кн.: *Ch. Babbage. A Method of Expressing by Signs the Action of Machinery. London, 1866.*

участие звено, указывается дополнительным значком; таким образом, действие механизма записывается группой условных значков. Система эта не получила распространения (как, впрочем, и другие подобные системы полиграфии в кинематике), так как, по словам Рело, «давала лишь сокращенное описание функционирования машины, не указывая на общие принципы ее составления».

В течение первой половины XIX в. в Англии не было создано системы высшего технического образования, и это дело было предоставлено частной инициативе. Но значительное распространение получили различные курсы для рабочих и мастеров, организуемые по инициативе самих слушателей. Так, возникли характерные для 20-х годов учебные клубы, известные под названием институтов. Почти одновременно появились и профессиональные содружества инженеров, одной из задач которых было оказание помощи их членам в усовершенствовании специальных познаний; одним из первых возникла Организация (Institution) гражданских инженеров. Но все это были паллиативы, а фактически в Англии господствовала система ученичества. В частности, для машиностроителей главной «школой» был завод фирмы «Модсли и Фильд», на котором получили профессиональную тренировку многие английские инженеры-механики первой половины века.

На рубеже XVIII и XIX вв. в Англии появилась техническая периодика. В 1797 г. Н. Никольсон создал первый в мире журнал по вопросам прикладных знаний — «Nicholson's Journal», в следующем году появился журнал «Philosophical Magazine».

Итак, технические и прикладные науки были представлены в английских университетах первой половины века небольшим количеством кафедр и естественно, что профес-



Ч. Беббидж

сорам, занимавшим эти кафедры, приходилось быть университетами и читать по несколько различных курсов. В частности, в Лондонском университетском колледже теорию машин читал профессор физики и астрономии Генри Мосли⁴⁷, а в Кембридже этим предметом занимались Уильям Уэвелл⁴⁸ и Роберт Виллис.

«Механика инженерного дела» Уэвелла была издана в 1841 г., несколькими месяцами раньше знаменитого сочинения Виллиса «Принципы механизмов». В предисловии автор указывает, что пользуется классификацией механизмов, разработанной Виллисом. Однако его работа принципиально отличается от книги Виллиса. Уэвелл рассматривает не только кинематику, но и статику и динамику машин. В одном вопросе он опережает Виллиса: он вплотную подошел к понятию кинематической пары и с новой точки зрения рассматривал «простые машины». «Машинами называются соединения материальных частей или звеньев,— определяет Уэвелл,— приспособленные для целей передачи или силы, или движения от одной части к другой и для различных изменений движений и силы.

Простыми машинами называются такие, которые состоят из одной или двух частей; состоящие из большего числа частей называются сложными машинами... Звенья машин воздействуют друг на друга следующим образом: 1) точечной связью...; 2) при помощи контакта поверхностей...; 3) гибкой связью...»⁴⁹

⁴⁷ Генри Мосли (Henry Moseley, 1801—1872) — капеллан королевы Виктории, президент Общества корабельных инженеров, член Королевского общества (1839). Работал в области математики, механики, машиноведения, физики, гидравлики. Основные работы по технической механике: *A treatise on mechanics applied to the arts*, London, 1839; *Theory of machines*, London, 1841; *The mechanical principles of engineering and architecture*, London, 1843; *Machine for calculating products, quotients etc.* — «*Philosophical Mag.*», 1847, v. 30.

⁴⁸ Уильям Уэвелл (William Whewell, 1794—1866) — декан Тринити-колледжа в Кембридже, с 1855 г. вице-канцлер университета, член Королевского общества (1820). Профессор минералогии, в 1838—1855 гг. — профессор философии и богословия. Написал ряд работ по теоретической и прикладной механике, а также по истории науки, архитектуре, астрономии, физике и др. Известна его «История индуктивных наук» в трех томах (Лондон, 1837—1838), переведенная на русский язык.

⁴⁹ W. Whewell. *The mechanics of engineering*. Cambridge, 1841, p. 2—3.



Р. Виллис

Собственно кинематикой в Англии в первых десятилетиях XIX в. занимались мало. Можно указать, в частности, на известное приближенное построение конического зацепления с помощью вспомогательных конусов, предложенное Тредгольдом⁵⁰. Однако с 1841 г. — года выхода в свет «Принципов механизмов» Виллиса — положение изменяется, и к середине XIX в. английская школа теории механизмов занимает важное положение.

⁵⁰ Томас Тредгольд (Thomas Tredgold, 1788—1829). Столяр по профессии, он поступил учеником архитектора в одну из лондонских строительных контор; с 1823 г. работал в Лондоне граждан-

Роберт Виллис родился 27 февраля 1800 г. в Лондоне в семье врача, учился в Кембриджском университете, по окончании которого сперва занялся естествознанием, а затем философией, прикладной механикой и архитектурой. С 1829 г. он преподавал в Кембриджском университете, в 1832 г. получил Джексоновскую кафедру (Jacksonian professor). В 1832 г. Виллис был избран членом Королевского общества, а в 1833 г. — действительным членом Британской ассоциации наук.

В 1837 г. Виллис опубликовал сообщения о зубчатых зацеплениях и об одонтографе. Очевидно, в эти годы он уже писал свои «Принципы механизмов» — одно из классических и основополагающих произведений в науке о машинах.

Умер Виллис 28 февраля 1875 г.

Виллис подошел к проблеме создания учения о механизмах с аналитико-критической точки зрения. Изучив сочинения своих предшественников, он пришел к выводу, что та наука, которую разрабатывали ученые до него и которую Ампер назвал кинематикой, еще не имеет ни системы, ни четко ограниченной области исследования. Поэтому первое, что нужно сделать, это разделить кинематику от динамики. Он не считал рациональным также введение в изучение гибких и жидких звеньев и рекомендовал ограничиться исключительно изучением механизмов с жесткими звеньями. Механизмы такого рода Виллис назвал «чистыми механизмами» (pure mechanism). И, наконец, он указал на то, что, прежде чем производить исследование механизмов, их следует классифицировать, исходя из некоторых ясных и логически обоснованных принципов. При этом Виллис указал на неясность и неопределенность понятия «элементарной машины» и определил понятие механизма, которое после него, с теми или иными изменениями, приобрело права гражданства в науке о машинах.

Вопрос о выделении кинематики в отдельную науку интересовал Виллиса и раньше. Он одним из первых — еще в своих лекциях в Кембриджском университете — поддерживал предложение Ампера. Позже, в 1840 г., его друг и

ским инженером. Написал много работ по вопросам строительства, теории упругости, термодинамики, транспорта. Теоретически обосновал применение чугуна в строительном деле. Построение конического зацепления Тредгольда опубликовано в кн.: Buchanan's Essays on Mill-work, by Tredgold, 1823, p. 103.

товарищ по университету Уэвелл в книге «Философия индуктивных наук» посвятил этому вопросу целую главу.

Рассматривая системы классификации механизмов, созданные до него, Виллис ставит в упрек школе Монжа то, что предложенная ею система пригодна лишь для перечисления и описания элементов машин, но ничего не дает для вычисления параметров их движения. Кроме того, по системе Монжа в науку введены динамические факторы и нетвердые звенья, что значительно расширяет само понятие механизма. По мнению Виллиса, систематика Борньи лучше приспособлена для описания механизмов, чем систематика школы Монжа, но также ничего не дает при исследовании законов движения отдельных механизмов. Кинематика же должна быть не описательной наукой, а расчетной.

На этом основании Виллис предлагает уточнить основное положение учения о механизмах и рассматривать их не как приспособления, служащие для преобразования движения, а как систему жестких звеньев, с помощью которой можно выполнить передачу и преобразование движения и которая зависит исключительно от конструкции этой системы. Тем самым Виллис связывает движение с геометрией механизма, исключает действие иных механизмов и рассматривает механизм как замкнутый в себе объект.

Исходя из этого Виллис основывает свою классификацию на следующих принципах.

1. Отношение скоростей. Если скорости ведущего и ведомого звеньев механизма зависят от соответствующих сил, то отношение их от сил уже не зависит. Принимается, что отношение скоростей может быть постоянным или переменным.

Во втором издании книги Виллис заменил принцип отношения скоростей принципом отношения направлений (directional relation) ввиду связи между обоими отношениями. Отношение направлений также может быть постоянным или переменным.

2. Элементарная форма механизма. Виллис распределяет все механизмы на четыре группы: механизмы с перекатывающимися звеньями, механизмы со взаимно скользящими звеньями, шарнирные механизмы, передачи гибкими звеньями (в последнем случае гибкое звено не считается элементом передачи, так как служит лишь

для выполнения передаточного отношения между двумя жесткими звеньями). Несколько позже Виллис добавил пятую группу — сдвоенные звенья.

«Первым основанием моей классификации, — пишет Виллис, — с помощью которой производится определение закона связи между скоростями и направлениями, является способ передачи движения, вопрос о котором, как мне кажется, полностью пренебрегается упомянутыми авторами (Ланце и Бетанкурор, Борньи). Эти способы я подразделяю на соприкосновение со скольжением и качением, шарнирные механизмы, гибкие связи, удвоение (reduplication). Ниже мы увидим, что относительные движения, выполненные при помощи этих способов, зависят от различных геометрических принципов и каждый возможный вид связи можно отнести к одному из указанных способов. Однако принцип действия многих комбинаций основан на сочетании двух или большего числа способов. В этом случае их положение в системе определяется тем способом, влияние которого является наиболее сильным. Вместе с тем каждая комбинация сводится к эквивалентной простой форме, а ее положение определяется только этой последней, ибо целью системы является сведение движений к вычислениям. С этой же целью и следует для каждой комбинации подыскать эквивалентную простейшую форму.

Например, действие комбинаций, в которых применяются зубчатые колеса, зависит отчасти от соприкосновения качением, а отчасти от соприкосновения скольжением, так как действие отдельного зуба относится к последнему виду, но общее их действие эквивалентно взаимному качению начальных окружностей, и только начальные окружности следует учитывать при расчете движения. Соответственно этому, все комбинации с зубчатыми колесами следует искать в разделе «Соприкосновение качением»⁵¹.

Простыми механизмами, по Виллису, являются такие, которые имеют по два или три подвижных звена. Он подразделяет их на классы: к классу *A* относятся механизмы, у которых отношение скоростей ведущего и ведомого звеньев сохраняет постоянную величину и знак для всего времени движения механизма; к классу *B* относятся меха-

⁵¹ R. Willis. Principles of Mechanism, 2-nd ed. London, 1870.

СИНОПТИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ КОМБИНАЦИЙ ЧИСТЫХ МЕХАНИЗМОВ (по Виллису)

Отношение направлений в-стоянно		Отношение направлений периодически меняющ-я	
Класс А		Класс В	
Отдел А Соприкосновение качение 4	Перекачивающиеся цилиндры, конусы и гиперболоиды. Общее устройство и форма зубчатых колес. Пигч	Перекачивающиеся кривые и колеса с поверхностями по кривым. Колеса Ромера. Колеса с неполным зубчатым венцом. Качающиеся рычаги	Зубчатые колеса с внутренним и наружным зацеплением. Храповики. Ограничители
	Зубцы колес различной формы. Кулачки. Винты. Бесконечный винт, или червяк с колесом	Качающиеся рычаги. Кулачки. Винт с переменным шагом. Мальтийский крест и другие периодические движения	Качающиеся рычаги. Кулачки вообще. Кулачок Уатта. Двойной винт. Спиральные и пространные кулачки. Ограничители
Отдел В Соприкосновение скольжением	Ременные приводы. Шкивы. Приводные цепи. Устройство для ограничения движения	Некруглые шкивы. Барабаны для пружин	Некруглые шкивы. Рычаги
Отдел С Гибкие передачи	Кривошипные и шатуновые механизмы для равных отклонений. Кривошип для ограничения движения. Кривошип механизма Белла	Шарнирные механизмы. Шарнир Гука	Кривошипы, эксцентрики и другие шарнирные механизмы. Храповые колеса. Периодические шатуновые механизмы
Отдел D Шарнирные механизмы	Тали всех видов (с параллельными нитями)	Тали с непараллельными нитями	
Отдел E Сдвигание			

низмы с отношением скоростей, переменным по величине, но постоянным по знаку; наконец, класс *C* включает в себе механизмы, у которых отношение скоростей постоянно, но отношение направлений переменное.

Дальнейшее подразделение классов на группы Виллис производит, исходя из способа передачи движения: 1) при помощи взаимного перекатывания поверхностей; 2) при помощи взаимного скольжения поверхностей; 3) при помощи гибкого звена; 4) шарнирными механизмами; 5) при помощи сдвигания звеньев. Далее Виллис рассматривает сложные механизмы. Он подразделяет их на два класса, исходя из принципа сложения скоростей и сложения перемещений.

Таковы основные принципы классификации Виллиса. Нельзя сказать, чтобы она была очень ясной, да автор и сам это понял и внес во второе издание своей книги некоторые коррективы, не особенно, впрочем, существенные. Очистив техническую кинематику от инородных включений, Виллис не смог провести последовательный анализ, в результате чего в его систематике механизмов оказались слабые места. А именно:

1. Классификация оказалась неполной, из нее выпали не только механизмы с нежесткими звеньями (за исключением гибких связей), но и ряд «чистых» механизмов, например механизм с двумя степенями свободы. Для того чтобы расширить свою классификацию и придать ей большую общность, Виллис ввел в нее впоследствии еще три группы механизмов, для которых отношение скоростей или отношение направлений зависит или от дополнительных органов, или от сил, чем нарушил свой первоначальный замысел.

2. Классификация не дает возможности применить к исследованию механизмов какие-либо общие методы, так как подобные по своему составу механизмы оказываются в различных ее разделах и, наоборот, в одном разделе собираются механизмы, имеющие очень мало общего между собой.

3. С помощью классификации Виллиса нельзя определить характер подобия между отдельными группами механизмов.

4. Разложение на элементы, которое Виллис начал, он не довел до конца. В каждом механизме он в сущности видит только два звена: ведущее и ведомое. Остальные звенья

и их поведение во время работы механизма выпадают из исследования. Таким образом, Виллис не смог использовать наиболее прогрессивную черту своей классификации.

Итак, Виллис не решил до конца задачу, поставленную перед механикой машин практикой машиностроения, — найти сродство между различными группами механизмов и подыскать подходящие способы их расчета. А следовательно, и упрек школе Монжа не имел под собой твердого основания: теория Монжа все-таки была более наглядной, и кроме того, она была проще.

Однако ценность работы Виллиса заключалась не только в разработке принципа систематизации механизмов. Он одним из первых разработал практически применимую теорию зацепления, которая открывается теоремой, впоследствии названной его именем. Эта теорема, связывающая характеристику профилей зубьев, находящихся в зацеплении, с законом изменения отношения угловых скоростей, является центральной темой книги; можно сказать, что все содержание книги является обобщением метода, разработанного автором в теории зацеплений. Иными словами, Виллис использовал в качестве классификационного признака частный метод исследования.

Кроме цилиндрических прямозубых колес Виллис рассматривает коническое зацепление, а также гиперболическое: здесь он допустил ошибку (исправленную во втором издании), приняв, что мгновенная ось относительного движения делит кратчайшее расстояние между осями на части, обратно пропорциональные угловым скоростям.

И, наконец, Виллис рассматривает рядовое соединение зубчатых колес, зубья которых профилируются по циклоиде.

Работа Виллиса не осталась в стороне от общего развития науки о машинах. Созданная им школа кинематики механизмов вышла за пределы Англии, и ее влияние давало себя знать еще в начале второй четверти нашего века. Если школа Монжа разложила машину на составные элементы и разработала принцип преобразования движений как ее кинематическую сущность, а Понселе развил теорию двигателя, то Виллису и его последователям принадлежит честь начала изучения промежуточных механизмов машин — передач.

Во втором издании книги Виллис называет в числе своих последователей Тэта, Ранкина, Фейрберна в Англии,

Лабулэ, Жиро, Беланже и ряд других ученых во Франции.

Томас Тэт опубликовал свои «Элементы механизмов» в 1851 г. В этом сочинении он решил увязать систематику Виллиса с «простыми машинами» и пополнить ее, включив в нее изучение нежестких звеньев. Тэт исходит из четырех элементарных форм механизмов (заимствованных у Виллиса), в которых устанавливает подобие с «простыми машинами» (аналогичную мысль несколько раньше высказал Лабулэ).

1. Шарнирные механизмы, движения звеньев которых по своему характеру соответствуют движению рычага.

2. Механизмы с гибкими звеньями, соответствующие блоку.

3. Колесные механизмы, движение которых характеризуется качением, соответствуют вороту (без учета каната).

4. Механизмы со взаимным скольжением звеньев, аналогичным движению по наклонной плоскости и винту.

При этом Тэт совершенно упустил из виду, что основным назначением «простых машин» является передача и преобразование силы, а не движения и что между понятиями статики и кинематики существует принципиальное различие. Впрочем, кинематика тогда еще находилась в состоянии становления как теоретическая наука, а поиски машиноведов были направлены на создание науки прикладной. Кроме того, как мы уже заметили, Тэт в этом отношении был не одинок.

Однако в своем анализе Тэт пошел дальше Виллиса. Он исключил «сдвоенные» механизмы из классификации, совершенно справедливо установив их полную подчиненность группе механизмов с гибкими звеньями. Затем он отказался от понятия «чистого» механизма и включил в рассмотрение механизмы с жидкими и газообразными звеньями (fluids), передающие движение с помощью давления.

Следуя Виллису, Тэт обращает значительное внимание на зубчатые механизмы, которые описывает довольно подробно.

«Зубья колес, — пишет он, — должны иметь криволинейную форму для того, чтобы движение передавалось от одного колеса к другому равномерно и мягко или, иными словами, чтобы между колесами было обеспечено совершенное качение. Если зубья имеют углы, то они в некото-

рых положениях проскальзывают, вследствие чего получается значительное трение и теряется равномерность вращения колес.

Круги, касающиеся друг друга в некоторой точке A и описанные из центров обоих колес, называются питчевыми окружностями. Радиусы последних берутся всегда пропорционально числу зубьев. Таким образом, если одно колесо имеет девять зубьев, а другое — 36, то радиусы колес будут относиться как 9 к 36, т. е. как 1 к 4. Следовательно, питчевые окружности будут катиться друг по другу, осуществляя то же вращение, которое воспроизведут зубчатые колеса после образования на них зубьев.

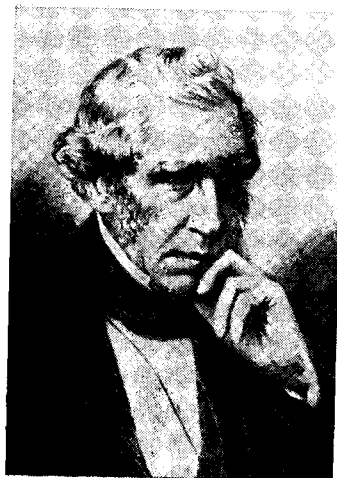
Разделим питчевую окружность на некоторое число одинаковых частей, равное числу зубьев колес. Тогда длина каждой из этих частей будет равна расстоянию, занимаемому зубом и впадиной, это расстояние и назовем питчем зубьев. Для чугунных колес обычно принимают питч равным следующим значениям: $1''$, $1\frac{1}{8}''$, $1\frac{1}{4}''$, $2''$, $2\frac{1}{2}''$ и $3''$. Если обозначим питч — p , диаметр питчевой окружности — d , число зубьев — n , то

$$d \cdot 3,1416 = np^{52}.$$

Таким образом, в середине XIX в. понятие питча в современном его значении еще не было выработано и словом питч обозначали шаг колеса по начальной (питчевой) окружности.

В 1855 г. пост королевского профессора гражданской инженерии занял выдающийся ученый, один из основоположников термодинамики, Маккуорн Ранкин (William John Macquorn Rankine, 1820—1872) — лингвист, музыкант, поэт, юморист и педагог. Начальное математическое образование он получил от своего отца, железнодорожного инженера, хотя начальным можно назвать его с большим приближением: в возрасте четырнадцати лет он досконально изучил «Математические основания натуральной философии» Ньютона. Учился в Эдинбургском университете, затем помогал отцу на железнодорожном строительстве. Его практическая работа и занятия молекулярной физикой привели его к термодинамике, которой он заинтересовался не только с теоретической точки

⁵² T. Tate. Elements of mechanism. London, 1851, p. 43.



У. Фэйрберн

жении мельниц. Первая часть этого трактата, «О принципах механизмов и двигателей», была посвящена теории механизмов. Фэйрберн исходит из четырех элементарных форм механизмов Виллиса: комбинируя их между собой и применяя принципы отношения скоростей и отношения направлений, он получает много вариантов, которые и исследует.

В разделе, посвященном шарнирным механизмам, Фэйрберн разбирает ряд задач, в частности задачу о кривошипно-ползунном механизме; в конце раздела он сообщает некоторые сведения о многозвенных шарнир-

ных механизмах. Значительное место он отводит рассмотрению передач с гибкими звеньями: здесь он рассматривает передачи со ступенчатыми шкивами, цепную передачу, вариаторы, системы блоков и полиспасты. В параграфах, посвященных передачам при помощи колес, описываются фрикционные и зубчатые колеса, системы зубчатых колес, зубчатые редукторы, конические и некруглые колеса, колеса с неравномерным распределением зубьев. В разделе передач скольжением рассматриваются ку-

тематику. Подружился с машинистом Джорджем Стефенсоном, по совету которого перешел на фабрику Пенна в Гринвиче, где очень быстро выдвинулся благодаря своему таланту.

Уже в 1814 г. в Манчестере работал гражданским инженером, занимался механическим оборудованием фабрик, заводов и мельниц. Позже перешел на судостроение.

В 1847 г. был избран почетным членом Общества инженеров-механиков, организованного в том же году и связанного с железнодорожным строительством (президентом общества был Стефенсон).

Фэйрберн был одним из основателей Британской ассоциации развития наук, членом Королевского общества и членом-корреспондентом Парижской академии наук.

лачки с поступательным и вращательным движениями, эксцентрики, пространственные кулачки, винтовая передача, комбинированные винтовые и зубчатые передачи.

По своему плану сочинение Фэйрберна уже близко подходит к учебникам теории механизмов начала XX в. Автор описывает много механизмов и старается сгруппировать их так, чтобы найти общие методы исследования. За пределы кинематики он не выходит, и о теории машин и его сочинении напоминает лишь указание на состав машины — двигатель, передачу и рабочий орган.

Таким образом, английская механика машин первой половины столетия очень быстро приобрела все характерные особенности прикладной науки. Это вполне соответствовало развитию английского машиностроения: в эти годы Англия была поставщиком-монополистом технологических машин. Раньше всех других европейских стран в Англии прошел промышленный переворот, в Англии была создана паровая машина как универсальный двигатель промышленности и транспорта, и машиностроение как отрасль промышленности ведет свой род также из Англии. Естественно, что другим, континентальным странам Европы пришлось прибегать к иным мерам, чтобы уменьшить свое отставание от Англии: в этом направлении важнейшими мероприятиями оказались развитие высшего технического образования и развитие прикладных наук. Важнейшая часть этой работы была выполнена во Франции, но многое было сделано и странами Средней Европы и Россией.

Промышленный переворот в странах Средней Европы — Германии, Австрии и Италии — начался позже, чем в Англии и во Франции, и имел характерные особенности, обусловленные рядом как социально-экономических, так и политических факторов. С определенной степенью точности можно было бы утверждать, что промышленный переворот пропозил по Европе со скоростью 15 километров в год.

Наибольшая из стран Средней Европы — Австрия — во второй четверти XIX в. находилась в апогее своего могущества. Однако было совершенно ясно, что это могущество эфемерно. Поражения австрийских войск в войнах с Наполеоном, революционные движения во Франции, низкое экономическое положение крестьянства и возмущающего пролетариата определили к середине века революционную ситуацию, в значительной степени окрашенную в национальные цвета.

Еще сложнее было положение в Италии и Германии. Если в Австрии среди поработченных народов преобладали сепаратистские тенденции, то немцы и итальянцы, разделенные многочисленными границами между большими, маленькими и мальчайшими королевствами, герцогствами и княжествами, стремились к национальному объединению. Таможенные барьеры не давали возможности развиваться ни промышленности, ни торговле, ни тем более путям сообщения. Вследствие этого положение трудящихся масс все ухудшалось, и в конце концов страны Средней Европы перед 1848 г. оказались в революционной ситуации.

Для того чтобы капиталистические отношения могли свободно развиваться, надо было уничтожить стоявшие перед ними преграды. Это обстоятельство питало оппозиционные настроения среди буржуазии и явилось причиной того, что революционные движения зачастую оказывались под эгидой идеологов буржуазии (впрочем, до определенного момента).

В 30-х годах XIX в. Италия была разделена на восемь небольших государств. Значительная часть страны — Ломбардия и Венеция, самые развитые в промышленном отношении, находились под властью Австрии. Но и остальные области Италии, имевшие «самостоятельных» властителей, находились не в лучшем положении. Италия начала XIX в. не полностью изжила феодальные отношения: хотя крестьяне и пользовались личной свободой, но земля оставалась в собственности светских и церковных феодалов, и за пользование ею пужно было платить аренду, отнимавшую большую часть труда крестьянина. В связи с этим внутренний рынок страны был крайне ограниченным, что тормозило развитие промышленности. В начале века только в северных областях Италии существовали более или менее крупные мануфактуры в текстильной промышленности; южные области были аграрными с господствующими полуфеодальными отношениями.

Фабричная промышленность начала развиваться в Италии к концу первой четверти века в ее северных областях. В середине 30-х годов в текстильной промышленности появились механические хлопкопрядильни, машины начали проникать и в другие отрасли производства. В 40-х годах были построены два машиностроительных завода, появились и паровые машины.

Медленно развивалось железнодорожное строительство: к 1845 г. в стране действовали только три линии небольшой протяженности (Падуя — Венеция, Милан — Монца, Ливорно — Пиза) да еще небольшая ветка возле Неаполя (с часовой у каждой станции), не работавшая в праздничные дни и ночное время.

Такое положение в хозяйственной жизни страны, естественно, не могло не отразиться и на состоянии науки. Наука, имевшая в Италии древние и славные традиции, в таких условиях зачастую не находила применения, и некоторые ученые, как, например, Лагранж и Борньи, предпочитали работать за границей.

Не лучше было в Италии и с организацией технического образования: оно ограничивалось несколькими профессиональными школами. Правда, некоторые технические науки преподавались в итальянских университетах (в Падуанском университете, основанном в 1361 г., уже в XVIII в. было введено преподавание прикладных знаний), однако метод преподавания был чисто описательным, тем более что университеты и не ставили перед собой цели подготовки инженеров.

Потребность в техническом персонале для развивающейся промышленности ранее всего возникла в северных областях страны. Еще в конце XVIII в. в Пьемонте была организована Академия наук, одним из членов-организаторов которой был Лагранж, а столица Пьемонта — Турин стала первым из итальянских центров технического образования. В 1845 г. в Турине была основана королевская Техническая школа, в которой впервые же в Италии был прочитан курс технической механики. Прочитал его профессор Туринского университета, организатор и первый директор Технической школы, член Туринской академии наук Карло Джулио (Carlo Giulio, 1803—1859).

Как и его предшественники, Джулио различает в машине три части: перводвижитель (*primo mobile*), механизм и орудие и в соответствии с этим указывает на три науки, изучающие машину. Науку, занимающуюся исследованием обработки тел, он называет технологией, науку о двигателях — прикладной механикой, а науку о механизмах — прикладной кинематикой.

Теоретически Джулио пытается согласовать школы Монжа и Виллиса и, нужно отдать ему справедливость, сделать это ему удается (в пределах, конечно, возможно-

го). Его работа — одна из самых интересных европейских работ в области науки о машинах середины века.

Джулио обращает внимание на то, что все механизмы построены из ограниченного числа элементов, а следовательно, «изобретение новой машины является лишь остроумным сочетанием известных частей, но расположенных иначе, для получения того действия, коим занялся изобретатель». Он близко подошел к понятию пары: «Так как осуществленной задачей каждого механического органа, каждого элемента машины являются преобразование движения и перенос его от приемника к инструменту, то он обязательно будет иметь по меньшей мере две части, одна из которых воспринимает движение, а другая передает его».

Первую из этих частей он называет ведущей, а вторую — ведомой. В зависимости от способа передачи движения он различает передачу непосредственным соприкосновением (качением и скольжением) и передачу при помощи промежуточных звеньев: сюда относятся шарнирные механизмы, механизмы с гибкими звеньями, сдвигавшие механизмы и с жидкими звеньями.

При изложении теории отдельных групп механизмов Джулио не придерживается принятой им классификации Ланца — Бетанкура по типу преобразования движений, а группирует их по методам исследования. Отсюда уже недалеко и до принципа преобразования механизмов. И действительно, после исследования кулачков, их построения и теории Джулио переходит к эксцентрикам, а от последних — к кулисным механизмам. Так, разбирая движение толкателя, приводимого в движение круглым эксцентриком, заключенным в рамку, прикрепленную к толкателю, он указывает, что этот механизм ни в чем существенно не отличается от механизма, состоящего из толкателя с перпендикулярно прикрепленной рамкой и приводимого в движение кривошипом с движущимся в рамке камнем. Интересно, что Джулио проводит эту мысль при изучении всех механизмов, сводя его к исследованию геометрического подобия схем и доказывая, что схемы могут иметь разнообразные реальные формы.

После исследования пространственных кулачковых механизмов и винтов, между которыми Джулио также обнаруживает принципиальное родство, он переходит к трещоточным механизмам, а затем к зубчатым зацепле-

ниям, обращая особенное внимание на свойства и способы построения циклоид.

Глава 31 посвящена исследованию сложных движений. Здесь рассматриваются механизмы с двумя и большим числом степеней свободы. В качестве примеров приводятся эллиптические механизмы, пантографы, планиметр. Тут же Джулио приводит пример, как при помощи сложения двух вращательных движений можно начертить бесконечное множество различных кривых. Построение, приводимое автором, сводится к шарнирному четырехзвеннику.

Заканчивается книга двумя правилами:

1. Прямому движению приемника соответствует прямое или обратное движение орудия в зависимости от того, парным или непарным будет число обратных механизмов (правил знаков).

2. Отношение скорости приемника к скорости орудия равняется произведению отношений скоростей всех элементарных механизмов машины.

Вторым правилом, представляющим собой закон определения передаточного числа при последовательном соединении механизмов, автор пользовался и раньше, в частности при определении результирующей скорости рядового соединения колес; понятия передаточного числа он не вводит.

Джулио утверждает при этом, что на двух указанных положениях можно построить связь кинематики с динамикой; для этого надо лишь использовать принцип виртуальных скоростей Лагранжа.

Если в Италии и Германии преобладали центроостремительные, национально-объединительные тенденции, то в «плоскостной монархии» Габсбургов национальные движения были центробежными. Австрия первой половины века представляла собой единую монархию (ставшую «двуединой» — Австро-Венгрией — лишь в результате революции 1848 г.), в которую кроме немецких по народности областей собственно Австрии входили: Венгрия (в свою очередь включавшая много славянских и румынских земель, в частности Словакию, Закарпатскую Украину, Буковину, Хорватию и Трансильванию), Чехия, Силезия и др. В одних частях страны личная зависимость крестьян от помещика была уничтожена, хотя и не полностью, еще в конце XVIII в., в других же она просуществовала до середины XIX в. Соответственно и хозяйственное развитие страны было чрезвычайно неравномерным.

В начале XIX в. вследствие войн с революционной Францией, а затем с Наполеоном в Австрии резко возросла потребность в текстильных товарах, железных изделиях, оружии, образовалась благоприятная конъюнктура для промышленного развития. Но хозяйственные условия и возможности отдельных провинций привели к тому, что промышленный переворот проходил здесь весьма замедленными темпами: он вызвал к жизни новые промышленные районы в Чехии и некоторых областях Австрии (в том числе и в столице — Вене). Хозяйственное же развитие огромных областей Венгрии, Тироля и Галиции задерживалось.

Противоречие между промышленным развитием одних частей страны и искусственно создаваемой отсталостью других, усугубляемое национальным угнетением и наличием полуфеодалных отношений в ряде областей страны, и явились одной из причин возникновения революционной ситуации. Следует добавить, что некоторые области, более высокоразвитые в промышленном отношении, например Северная Италия, не только не пользовались преимуществами своего хозяйственного положения, но, наоборот, сами являлись рынками сбыта для промышленности центральных районов страны.

Из наиболее развитых промышленных областей Австрии Чехия имела, пожалуй, самые старые культурные и промышленные традиции. Здесь уже в начале XVIII в. мануфактурная промышленность достигла расцвета. Один из старейших университетов — Карлов университет в Праге — был основан в 1348 г. Корни инженерного образования также уходили довольно глубоко: в 1718 г. в Праге была открыта Инженерная школа (с одним профессором и девятью учениками). В 1787 г. эта школа была преобразована в Школу гражданских инженеров, учебные программы которой приближались к программам философского факультета Карлова университета. На базе школы гражданских инженеров в 1806 г. в Праге был основан Политехнический институт (где преподавание велось на немецком языке) и с реальной школой при нем. Организатором и первым директором Политехнического института был выдающийся чешский ученый Ф. И. Герстнер⁵⁵.

⁵⁵ Франтишек Иозеф Герстнер (F. J. Gerstner, 1756—1832). Сын бедного ремесленника. В 1772 г. окончил Пражский университет,

В 1861 г. в качестве языка преподавания в институте был введен чешский язык, а в 1868 г. институт был разделен на две политехнические школы: немецкую и чешскую.

Герстнер много работал над применением механики к строительству и горному делу. Его большой трехтомный труд «Руководство по механике» содержит много интересного материала, но в части прикладной механики построен на старых основаниях. По поводу состава машин Герстнер пишет, что «обычно делают машины на простые и сложные. Самая простая машина, которую следует изучить прежде всего, — это рычаг. Далее мы рассмотрим ворот, блок, полиспаст, наклонную плоскость, винт и клин. Все эти машины — простые машины. Составные машины всегда являются результатом комбинации нескольких простых машин, и поэтому их следует изучать только после первых»⁵⁶.

В Вене Политехнический институт был открыт в 1815 г. Из его выпускников особенно много сделал в области прикладной механики Фердинанд Редтенбахер. С Веной же была связана научная и педагогическая деятельность Андрея Баумгартнера⁵⁷ — автора «Руководства по практи-



Ф. Редтенбахер

где занимался главным образом математикой и астрономией. В 1779 г. получил звание гражданского инженера. С 1779 г. — профессор математики университета, с 1804 г. — руководитель его физико-математического отделения. В Политехническом институте читал механику.

⁵⁶ F. J. Gerstner. Handbuch der Mechanik. Prag, 1831, S. 73.

⁵⁷ Андрей Баумгартнер (Andreas von Baumgartner, 1793—1855). Родился в Фридберге (Чехия), преподавал математику и физику в Ольмюцком лицее. С 1823 г. — профессор математики и механики в Венском университете. С 1848 г. — министр общественных работ, позже министр торговли и промышленности. Президент Венской академии наук (1851).

ческой механике», изданного в 1823 г. Это руководство относится к тому направлению в механике машин, которое было характерным для Австрии и Германии первой половины XIX в., до Рело, и наиболее выдающимися представителями которого были Вейсбах и Редтенбахер. Оно имело машиностроительную направленность, однако в отличие от английского направления в науке, также «машиностроительного», но занимавшегося изучением механизмов, немецкое направление занималось самой машиной. В сущности эта школа заложила основы той части прикладной механики, которая позже приобрела наименование курса «деталей машин».

Руководство Баумгартнера написано было на основе лекций, которые он читал для техников и ремесленников в Ольмюцском лицее. Три первых раздела, занимающие больше половины книги, посвящены динамике — движущим силам и силам сопротивления в машинах (трение, сопротивление канатов, сопротивление среды). В четвертом разделе автор переходит к рассмотрению машины и определяет ее как «приспособление, с помощью которого сила действует на точку, находящуюся вне ее направления, иначе, чем если бы сила действовала на нее непосредственно»⁵⁸. Определение крайне общее, поэтому оно относится и к «простым машинам», которые отличаются от сложных тем, что ни одна из их частей уже не является машиной.

Баумгартнер делит машины на два рода в зависимости от типа соединения механизмов: параллельного или последовательного. Движение машин он разбирает по Эйлеру и оценивает его по величине превышения момента действующей силы над моментом сопротивления. Таким образом, его теория машин основана на оценке эффективности последних.

Значительное место отводит Баумгартнер исследованию зубчатых колес и их изготовлению. Он указывает, что материал для изготовления зубьев должен быть прочным и изнosoустойчивым. Этому условию удовлетворяют латунь, которую применяют для малых, например часовых, колес, и крепкие сорта дерева — берест, терец, яблоны, применяемые для больших колес. Очень важным

является вопрос формы зубьев: она выясняется математическим исследованием, а для изготовления зубьев следует применять шаблон. Впрочем, обычно удовлетворяются приближенной формой, так как трение доделывается остальное⁵⁹.

Заканчивается книга некоторыми сведениями по сопротивлению материалов, конструированию и постройке машин. Автор рекомендует для изготовления машин применять в основном дерево и не увлекаться металлом, так как это может повысить стоимость машины. При постройке машин следует учитывать их прочность, вес и цену.

В 20-х годах в Венском политехникуме преподавал механику и машиностроение Адам фон Бург (Adam von Burg, 1797—1882). Сын столяра, он сначала изучил столярное ремесло у своего отца, затем поступил в архитектурную школу; после этого учился в Венском университете. В 1848 г. был избран в Венскую академию наук. Его книги — «Руководство по элементарной механике и машиноведению» (1846) и «Учебник машиноведения» (1856) — отличаются ясностью. Бург говорил, что очень начальной является разница между образцовым, иногда длинноватым, но зато естественным и ясным изложением Эйлера, который и самое трудное умел сделать легким, и тяжелым изложением некоторых новых ученых, умеющих даже самое легкое делать трудным и непонятным.

В течение первой половины XIX в. продолжалась борьба между Австрией и Пруссией за гегемонию в Германском союзе. Германия того времени сохраняла еще очень многое из пережитков феодализма. Свыше 300 королевств, княжеств, вольных городов и полусамостоятельных владений рейнских баронов делили страну на отдельные территории, связь между которыми была слабой. Основной формой производства было цеховое ремесло; к концу XVIII в. начала развиваться и мануфактура. Внутренний рынок был ограниченным: крестьянство, составлявшее большинство населения, не имело личной свободы и покупательная способность его была ничтожной. Таможенные границы и плохие дороги препятствовали развитию торговли.

⁵⁸ A. Baumgartner. Die Mechanik in ihrer Anwendung auf Künste und Gewerbe. Wien, 1823, S. 154.

⁵⁹ Там же.

Начало XIX в. принесло некоторые перемены. В результате войн с революционной Францией, а затем с Наполеоном господствующие классы вынуждены были пойти на освобождение крестьянства от крепостной зависимости. Число германских государств (в значительной степени по воле Наполеона) сократилось; однако в половине второго десятилетия в Германский союз все еще входили 38 независимых государств, самым крупным из которых была Пруссия. И все же это стимулировало начало хозяйственного развития: появились первые фабрики и заводы.

Исторически наиболее древней отраслью промышленности в Германии было горное дело, с которым и связаны были первые технические школы (в Брауншвейге, Фрайберге и Клаустале). Почти одновременно с Брауншвейгской горной школой (1745) была основана Саксонская инженерная академия (1743), ставшая образцом для Мезьерской школы.

В 1833 г. 18 государств объединились в Таможенный союз. Это объединение облегчило возникновение внутреннего рынка для германской промышленности и явилось мощным толчком, ускорившим прохождение промышленного переворота. В связи с этим возникают и технические школы. Почти все они были основаны как средние учебные заведения или как ремесленные училища, но очень быстро были преобразованы в высшие школы. В 1825 г. была основана Политехническая школа в Карлсруэ, в 1827 г. — высшие технические школы в Мюнхене и Нюрнберге; в том же году Королевская строительная академия, основанная в Берлине в 1799 г., выделила из своего состава Промышленный институт. В 1828 г. было открыто Техническое учебное заведение в Дрездене, в 1831 г. — Высшее ремесленное училище в Ганновере, в 1840 г. — Политехническая школа в Штутгарте. Таким образом, к середине века Германия уже имела много средних и высших технических школ. Кроме того, в некоторых университетах были созданы кафедры технологии; профессора физики, механики и математики читали курсы прикладной механики.

В 1821 г. профессор Тюбингенского университета Поппе⁶⁰ опубликовал «Руководство по машиностроению».

⁶⁰ Иоганн Генрих Моритц Поппе (Johann Heinrich Moritz Poppe, 1776—1854). Сперва часовщик, затем преподаватель физики и ма-

Он считал, что все машины, в том числе самые сложные, состоят из «простых машин», причем последние он сводит всего к двум: рычагу и наклонной плоскости. Подобной классификации, целиком унаследованной от механиков XVIII в., придерживались и другие немецкие машиноведы. Классификации эти отличались лишь количеством «простых машин», к которым сводятся все сложные. Так, Лангсдорф⁶¹ пишет: «В трактатах, даже самых старинных, машины делятся на простые и сложные, причем эти последние считаются составленными из комбинаций некоторого числа простых машин. Простые машины в этих работах ограничиваются рычагом, шкивом, наклонной плоскостью, клином, винтом и воротом. Наклонная плоскость, поскольку она находится в состоянии покоя, все же не должна включаться в такую классификацию, ибо в этом состоянии она не является машиной, разве только мы сбросим ее с горы. Клин представляет собой наклонную плоскость, и очевидно, что его нельзя отнести к иному виду простых машин...»⁶² Наконец, Кайзер⁶³ считает, что «все простые машины сводятся к трем типам: рычагу, наклонной плоскости и веревке».

Так немецкие машиноведы поставили вопрос о сущности и составе машины, и спор об этом затянулся до последней четверти XIX в. Интересно, что основным содержанием немецких учебных книг по машиноведению было в сущности описание деталей машин. Так, большая часть «Лекций по машиностроению»⁶⁴ Зальценберга отведена деталям машин. Машину он определяет как соединение движущихся тел, которое под действием сил производит работу, выражающуюся в изменении местоположения тела или его формы. Значительную часть

тематики в гимназии, с 1818 г. — профессор Тюбингенского университета. Написал энциклопедическое руководство по машиностроению, много работал по вопросам истории техники.

⁶¹ Карл Христиан Лангсдорф (Karl Christian Langsdorf, 1757—1834) — профессор машиноведения в Эрлангенском университете. Читал затем технологию в Виленском и математику в Гейдельбергском университетах. Занимался также математикой, физикой и гидравликой.

⁶² C. Ch. Langsdorf. Ausführliche System der Maschinenkunde, Bd. I. Heidelberg, 1826, S. 277.

⁶³ E. H. A. Kayser. Handbuch der Mechanik mit Bezug auf ihre Anwendung. Karlsruhe, 1842.

⁶⁴ N. Salzenberg. Vorträge über Maschinenbau. Berlin, 1842.



Ю. Л. Вейсбах

книги автор отводит зубчатым передачам (с. 77—162); затем следуют ременная и фрикционная передачи и регулирование хода машины.

Рассматривая преобразование движений, автор указывает, что изучать нужно не только скорость и направление движения, но и его вид. Движения в машинах бывают почти исключительно прямолинейные или вращательные. Здесь он возвращается к принципам Монжа.

Рассмотрим творчество выдающегося немецкого ученого-машиностроителя Вейсбаха. Юлиус Людвиг Вейсбах (Julius Ludwig Weisbach, 1806—1861) с 1820 по 1826 г.

учился во Фрайбергской горной академии, а затем в Гёттингенском и Венском университетах. В 1833 г. получил в Горной академии кафедру прикладной механики и горных машин. Кроме этих предметов он читал также маркшейдерское искусство, кристаллографию, машиноведение и начертательную геометрию. Выдающийся лектор, Вейсбах обладал большим педагогическим талантом, который сказался и в его произведениях, по праву считавшихся в XIX в. классическими. В 1836 г. было издано его «Руководство по горной механике», в котором к вопросам практического машиностроения впервые был применен анализ. Более элементарным является изложение в главном труде Вейсбаха — «Учебнике инженерной и машинной механики»⁶⁵, издававшемся в течение пятнадцати лет. Кроме этих основных работ Вейсбаху принадлежит еще более 50 статей, напечатанных в основном в журнале «Civilingenieur». В 1859 г. Лейпцигский университет присвоил Вейсбаху звание доктора honoris causa. Учениками

Вейсбаха были, в частности, Цейнер, М. Рюльман, И. А. Тиме.

Первая часть «Учебника», содержавшая теоретическую механику, вышла в свет в 1845 г. За ней в конце 1847 г. последовала вторая часть, содержавшая практическую механику. Третья часть вышла в 1860 г.; обе последние части были посвящены учению о машинах.

Еще при жизни автора вышли в свет 2-е и 3-е издания двух первых томов, совершенно переработанные. Посмертно вышли 4-е и 5-е издания первых томов и 2-е издание третьего тома. В 1859—1863 гг. «Теоретическая и практическая механика» Вейсбаха была издана на русском языке; вышли английский, шведский, итальянский, французский, испанский и польский переводы этой книги, ставшей в XIX в. одним из самых распространенных учебников по общему машиноведению. И по объему он был одним из самых больших: в нем насчитывалось около четырех тысяч страниц!

Объект своего исследования — машину — Вейсбах определяет так: «Все искусственные приспособления, посредством которых дается возможность силам производить механические работы, называются машинами. Сооружения отличаются от машин тем, что их целью является восстановление состояния равновесия между силами, проявляющимися от взаимного действия различных тел. Инструменты в сущности не отличаются от машин; они служат для произведения небольших работ руками человека»⁶⁶. Определение Вейсбаха, общепринятое для немецкого машиноведения середины XIX в.⁶⁷, включает не только собственно машины, но и любые приспособления, служащие для производства какой-либо работы, в том числе и «простые машины». Однако Вейсбах пользуется и результатами анализа машины, полученными французскими учеными. В 1839 г. он, в бытность свою в Париже, познакомился с Пон-

⁶⁶ Ю. Вейсбах. Теоретическая и практическая механика, т. II. Спб., 1861, с. 304.

⁶⁷ На неверность такого определения машины указал К. Маркс: «Математики и механики — и это повторяют некоторые английские экономисты — говорят, что орудие есть простая машина, а машина есть сложное орудие. Они не видят никакого существенного различия между ними...» К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 23, с. 382.

⁶⁵ J. Weisbach. Lehrbuch der Ingenieur und Maschinenmechanik, Bd. I—III 1845—1860.

селе, Кориолисом и Мореном и сведения об их идеях в этом направлении получил, так сказать, из первых рук.

Одним из основных понятий, которые ввел Вейсбах при исследовании машин, явилось понятие коэффициента полезного действия. Последний определяется из выражения

$$\lambda = \frac{L - L'}{L},$$

где L — затраченная работа, а L' — «бесполезная» работа.

Первая часть третьего тома труда Вейсбаха посвящена механике привода. Автор предполагает, что двигатель может сообщить машине лишь два типа движения: вращательное и возвратно-поступательное прямолинейное. Задачей привода и является преобразование этих движений в движения, необходимые для правильного функционирования исполнительного органа машины. Механику привода автор излагает вместе с изучением его деталей, поэтому кинематика играет тут подчиненную роль. Автор не задается никакой предварительной систематикой и описывает механизмы или, скорее, детали, собирая их в группы по подобию методов исследования. Иногда, впрочем, он отклоняется от этого принципа: червячную передачу, например, он описывает не в главе о зубчатых зацеплениях, а вместе с винтовой передачей. Впрочем, он замечает, что при сечении червяка плоскостью, проходящей через его ось, получается картина, «похожая на зубчатую полосу» и поэтому поперечный профиль передачи можно начертить при помощи обычных способов изображения зацепления колеса и гребенки.

Теорию зубчатых зацеплений Вейсбах излагает очень подробно. О профилировании зубьев он пишет: «Очертание зубьев по развернутой дуге круга во всяком случае совершеннее всех других способов начертания зубьев; оно уступает только в том эциклическим зубьям, что доставляет более длинные зубья и поэтому требует большего числа зубьев, сравнительно с последним»⁶⁸.

Космические колеса, их теорию и метод приближенно-го изображения Вейсбах излагает по Тредгольду, теорию эксцентриков и кулачков — вместе с кривошипными, ибо последние «весьма незначительно отличаются от эксцентриков».

⁶⁸ Ю. Вейсбах. Теоретическая и практическая механика, т. III, отд. 1, с. 208.

Шестая глава посвящена приводам, редко встречающимся в машинах. Автор относит к ним эллиптические, спиральные и другие специальные типы колес, приводы прерывного движения, приводы с выстоями, эциклические и дифференциальные механизмы.

В последней, седьмой, главе Вейсбах рассматривает регуляторы и маховые колеса.

Вторая часть третьего тома содержит механику исполнительных механизмов, которые автор делит на две группы: 1) для передвижения предметов и 2) для изменения предметов (технологические машины). Следуя этой систематике, автор в раздел о грузоподъемных машинах включает и рычаги. Аналогично раздел, посвященный машинам, служащим для перевозки грузов, охватывает все транспортные средства от тачки до локомотива. Оба эти раздела написаны очень подробно и в целом дают ясное представление о технике середины XIX в. В разделе, посвященном машинам, служащим для изменения предметов, Вейсбах ограничивается описанием толчей и нескольких типов молотов.

Вместе с Вейсбахом над развитием учения о машинах работал Редтенбахер. Можно сказать, что эти два ученых создали в Германии новое научное направление в этой области.

Фердинанд Редтенбахер (Jacob Ferdinand Redtenbacher, 1809—1863) родился в Штейере (Верхняя Австрия), учился в Венском университете и Венском политехникуме. С 1829 г. работал в Венском университете ассистентом по механике и машиностроению. В 1833 г. переехал в Цюрих, преподавал математику и черчение в Высшем ремесленном училище и одновременно изучал практическое машиностроение на заводе Эшер и Висс. Уже в Цюрихе он начал размышлять над вопросами взаимосвязи между производством и наукой и над вопросами технического образования.

В июле 1840 г. Редтенбахера пригласили в Политехнический институт в Карлсруэ. Он принял приглашение и с 1841 г. читал там курсы рациональной механики, общей теории и конструирования машин; с 1857 по 1863 г. был директором института.

Редтенбахер был первым из ученых, глубоко задумавшимся над проблемами технического мышления. До него механика машин представляла собой физико-математиче-

скую дисциплину и приложение ее к техническим вопросам было чисто формальным. Если же над ее проблемами работал техник, то в исследовании превалировали практические вопросы, в которых растворялась механика машин. Редтенбахер решил создать научное машиностроение, которое бы представляло собой гармоническое сочетание теории и практики. Первым трудом его, посвященным этим вопросам, были «Принципы механики», изданные в 1852 г. В этой книге изложено теоретическое учение о машинах. В 1862–1865 гг. вышло из печати второе сочинение Редтенбахера — «Машиностроение». Содержанием его явилась практика конструирования. Третья книга Редтенбахера — «Результаты для машиностроения» (1848) — была посвящена ряду вопросов теории машиностроения. Кроме того, Редтенбахер написал ряд сочинений по отдельным направлениям машиностроения.

Редтенбахер был всесторонне образованным человеком: он превосходно знал литературу, историю искусства, историю философии. В ряде его статей и заметок виден большой интерес к проблемам истории и теории науки. Он занимался и живописью, и, как вспоминали его ученики, даже его построения на черной доске были «маленькими шедеврами». Он очень любил музыку, в особенности сонаты Бетховена, и был талантливым педагогом. Книги его написаны мастерски: восторженную оценку его «Принципов» дал, между прочим, известный русский машиновед А. И. Сидоров⁶⁹. Вейсбах оказал большое влияние на развитие методов расчета машин; влияние Редтенбахера было сильнее и глубже. Можно сказать, что в 50–60-х годах XIX в. германские технические школы перестроили свое преподавание в духе Редтенбахера, а Политехникум в Карлсруэ стал образцом в деле подготовки инженерных кадров для промышленности.

Большой заслугой Редтенбахера является то, что он внес ясность в определения механизма и машины. «Многообразные механизмы движения, которыми пользуются для устройства рабочих машин, — указывает он, — не должны заново изобретаться каждый раз. Однако в свое время это было необходимо, когда были изобретены па-

ровые и прядильные машины, так как тогда были известны лишь немногие механизмы для преобразования движений. Теперь же известно очень много разнообразных механизмов и всегда можно отыскать такой, который подходит для частного случая. Таким образом, лишь для совершенно необычных условий движения действительно необходимы новые изобретения, и очень ясное и полное знание изобретенных до настоящего времени передаточных механизмов, служащих для устройства рабочих машин, является чрезвычайно важным»⁷⁰.

В определении понятия машин Редтенбахер исходит из идеи механического процесса, являющегося или перемещением в пространстве или формообразованием: «В механическом процессе, вызванном действием некоторой машины, принимают участие тела тройкого вида, а именно: 1) мотор, который содержит в себе активный принцип; 2) тело, которое должно изменяться и которое является противодействием; 3) посредствующая машина, связанная, с одной стороны, с двигателем, а с другой — с изменяемым телом.

Эти немногие замечания о цели машины заставляют признать, что в механическом процессе она действует не как активная сила, а лишь воспринимает развиваемое двигателем действие, которое и передаст изменяемому телу»⁷¹.

Выяснив затем основные составные части каждой полной машины и сведя их к силовой машине «аппарат для восприятия силы, т. е. совокупность всех частей, которые должны быть налицо, для того чтобы приемник мог целесообразно исполнять свою функцию», трансмиссии и рабочей части машины, Редтенбахер определяет составные части некоторой совокупности машин: «...полная совокупность машин (vollständige Maschinenwerk) состоит из следующих существенных составных частей: 1. Для простого рабочего процесса — из силовой машины, трансмиссии и орудия. 2. Для сложного рабочего процесса — из силовой машины, трансмиссии и рабочей машины. 3. Для системы рабочих процессов — из силовой машины, трансмиссии и системы рабочих машин»⁷².

⁷⁰ F. Redtenbacher. Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbaues. Mannheim, 1852, S. 279.

⁷¹ Там же, с. 203.

⁷² Там же, с. 205.

⁶⁹ А. И. Сидоров. Основные принципы проектирования и конструирования машин. М., «Макиз», 1929.

На основании изложенных принципов Редтенбахер пришел к выводу, что классифицировать механизмы нельзя, их следует рассматривать лишь в процессе практического применения. Теория машин должна соответствовать подразделениям их совокупности, и, таким образом, единая наука о машинах логически распадается на ряд ветвей. Рело считал большой заслугой Редтенбахера четкое определение задач, стоявших перед каждой из частных наук о машинах.

Таковым было развитие учения о машинах в странах Западной Европы, приведшее к становлению кинематики механизмов и динамики машин как двух важнейших отраслей науки о машинах. Механика машин возникла как прикладная наука, но уже во втором полувековии она сама выделила ряд фундаментальных направлений. Более того, она не только пользуется результатами аналитической механики, но и влияет на последнюю, побуждая ее развивать новые направления, становление которых было вызвано именно потребностями механики машин. Таким, в частности, был генезис теоретической кинематики, кинематической геометрии, теории автоматического регулирования, теории механизмов для воспроизведения математических зависимостей и некоторых других направлений.

Нам следует ознакомиться еще с теми результатами, которые были получены к середине XIX в. в России.

Глава пятая

СТАНОВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ МЕХАНИКИ МАШИН В РОССИИ

В книге «История черной металлургии в СССР» академик С. Г. Струмилин показывает, что вторая треть XIX в. была для России периодом промышленного переворота, временем перехода от мануфактурного к крупному машинному производству. «Подобно тому как в XVIII в. эпизодическое распространение отдельных машин на мануфактурах еще не превращало их в фабрики, так и появление первых единичных фабрик в XIX в. до 1830-х годов не могло еще поколебать господства мануфактурного строя в России... Но начиная с 30-х годов XIX в. умножение фабрик в крепостной России приобретает такое ускорение, при котором количественные сдвиги в техническом перевооружении мануфактур создают уже новое качество и новый облик отраслей крупной промышленности. Систематическое применение машин в этих отраслях, мощным скачком повышая в них уровень производительности труда, приводит по закону стоимости и к соответствующему снижению цен. А снижение в несколько раз цен во столько же раз, если не больше, расширяет рынок для удешевляемой фабричной промышленности»¹.

Действительно, если в 1804 г. в России было 2423 предприятия с 148 тыс. рабочих, то в 1826 г. эти числа дошли соответственно до 5128 и 200 тыс., а в 1856 г. — до 11 556 и 518 тыс. рабочих. При этом непрерывно увеличивалось и число вольнонаемных рабочих, которое в 1825 г. составляло всего лишь 54% от общего их числа, а в 1860 — уже 87%.

Косвенными причинами, если не побудившими, то во всяком случае ускорившими процесс «машинизации» рус-

¹ С. Г. Струмилин. История черной металлургии в СССР, т. I. М., Изд-во АН СССР, 1954, с. 403.

ской промышленности, явились континентальная блокада и последовавшая за ней Отечественная война 1812 г. Очень быстро, в течение нескольких лет, России пришлось перейти на «самообеспечение» по нескольким важным отраслям промышленности. Этот переход был облегчен и достаточно хорошим (по сравнению с Западной Европой) техническим обеспечением русских заводов, и весьма удовлетворительной (по сравнению с ближайшими соседями) подготовкой инженерных кадров.

Машинная техника в России начала развиваться в хлопчатобумажной промышленности. Еще в XVIII в. на протяжении одной трети века количество мануфактур начало расти с необычайной быстротой; в 1767 г. здесь было 7 хлопчатобумажных мануфактур, а в 1800 г. — 240. Медленно развивались полотняная, шелковая и суконная промышленность. Изобретения «по части машин», характерные для периода промышленного переворота, начинают появляться и в России. Так, в Серпейске Калужской губернии служащий прядильной мануфактуры Родион Глишков в 1756 г. построил собственную механизированную фабрику. В 1760 г. он изобрел 30-веретенную машину для прядения льна с приводом от водяного колеса и мотальную машину, заменившую десять человек; тогда же он построил и другие машины. К 1771 г. у него были: прядильная машина с соответствующим оборудованием и чесальная машина с ручным приводом, повысившая производительность труда в 15 раз.

С начала XIX столетия в России развивается прядильное производство: первой бумагопрядильной фабрикой стала Александровская мануфактура, основанная в Петербурге в 1798 г. по проекту М. Оссовского. Она была реконструирована в начале 40-х годов под руководством А. А. Бетанкура, который запроектировал и построил для этой мануфактуры в мастерских Института корпуса инженеров путей сообщения ряд новых машин.

Опыт Александровской мануфактуры и влияние введения машин в прядении на производительность труда явились стимулом к устройству частных механических прядильных фабрик; в 30-х годах в Петербурге вошли в строй три фабрики, а к началу 40-х годов — бумагопрядильни в Московской, Владимирской и Рязанской губерниях, положившие начало созданию центрального текстильно-фабричного района в России (основой для кото-

рого явились мануфактуры конца XVII—XVIII в.); следом за механизацией прядения здесь механизмуется ткацкое и ситцевое производство. Как указал В. И. Ленин, «капиталистическая организация хлопчатобумажной промышленности сложилась до освобождения крестьян»².

Следом за текстильной промышленностью машины проникают в другие отрасли производства. Механизация и хлопчатобумажной, сахарной, полиграфической, а также некоторых других отраслей промышленности вызвала необходимость в машинах для соответствующих производств; сначала их ввозили (главным образом из Англии), а затем очень медленно и неуверенно начали производить собственными силами, причем из первых русских фабрик стала на путь производства технологических машин Александровская казенная мануфактура.

В первой половине XIX в. центром русского машиностроения станет Петербург. Здесь еще в 1790 г. был организован частный машиностроительный завод англичанина Берда. Он изготовлял металлорежущие станки и паровые машины. В 1817 г. завод получил привилегию на постройку пароходов. К середине века начали работать Невский машиностроительный завод и завод Макферсона — впоследствии Балтийский. К середине века развивается машиностроение в Нижнем Новгороде, Москве, Костроме, Екатеринбурге. В 1849 г. был основан Сормовский завод, называвшийся сперва Нижегородской фабрикой буксирного и завозного пароходства: до 1860 г. он выпустил около 60 пароходов; в этом году число рабочих на «фабрике» достигло 577 человек. В 1857 г. в Нижнем Новгороде открылся механический завод И. Колчина — второе крупное предприятие города.

Интересны цифры (в тыс. руб. серебром) ввоза машинного оборудования в Россию и внутреннего производства его на протяжении 4—6 десятилетий века:

	Ввоз	Внутреннее производство
1831—1840	4 100	2 750
1841—1850	11 700	4 900
1851—1860	48 100	36 500

² В. И. Ленин. Полное собрание сочинений, т. 1, с. 520.

Таким образом, несмотря на относительно быстрое движение промышленного переворота, русская машиностроительная промышленность не могла еще снабдить Россию машинами собственного производства. Импорт значительно превышает внутреннее производство, и сама промышленность резко отстает от промышленности Западной Европы и по относительной механизации, и по выпуску готовой продукции.

Но этого нельзя сказать об уровне высшей школы и исследовательской работы в области машиностроения. Здесь в определенной степени повторяется то же, что и во Франции в конце XVIII в., хотя там это было обусловлено иным расположением важнейших причин. В связи с отсталостью промышленности существенное значение получает развитие высшей технической школы, которая очень быстро занимает подобающее место среди первоклассных европейских высших технических школ. В XIX в. происходит становление русской науки; с очень небольшим опозданием по сравнению с Францией возникают прикладные и технические науки. Важное решение А. А. Бетанкура о переносе Макарьевской ярмарки в Нижний Новгород способствовало ускорению промышленного переворота на Волге и в Заволжье: в 1817 г. на Пожевском заводе на Каме, в 150 верстах выше Перми, горный инженер П. Г. Соболевский спроектировал и построил два небольших парохода с паровыми машинами в 6 и 36 л. с. В 1821 г. помещик Евреинов построил пароход «Волга» с паровой машиной в 60 л. с. — он мог вести за собой две-три баржи с грузом от 30 до 50 тыс. пудов и до 150 пассажиров. Так началось пароходное сообщение по Волге; грузовой рейс от Астрахани до Саратова длился 12 дней. Кроме этого парохода Евреинов завел на Волге еще два парохода с паровыми машинами в 16 и 30 л. с.

Развитие частной машинной промышленности вызвало появление учебных заведений нового типа. Высшие технические школы XVIII в. готовили офицерский состав для служб военной, путей сообщения и горной. В эти школы принимали преимущественно, если не исключительно, лиц привилегированных сословий, которые по окончании обучения шли на коронную службу и получали чины и звания наравне с армейскими офицерами. В России первым учебным заведением нового типа стал Технологический институт. Он был основан в 1828 г. по инициа-

тиве министра финансов Е. Ф. Канкрина и, по мысли последнего, должен был «способствовать распространению и прочному устройству мануфактурной промышленности в империи». В «Положении об устройстве Санкт-Петербургского технологического института», утвержденном в 1828 г., указывалось, в частности:

«1) Цель практического Технологического института есть та, чтобы приготовить людей, имеющих достаточные теоретические и практические познания, для управления фабриками или отдельными частями оных...

13) Кандидаты избираются городскими думами из детей купцов 3-й гильдии, мещан, цеховых и разпочинцев, без различия вероисповедания и при равных способностях, преимущественно из сирот и недостаточных больших семейств...

От кандидатов тех провинций, где употребительный в общежитии язык не есть русский, не требовалось, чтобы они знали читать и писать на оном, а обучить их в институте...

15) Выпускным воспитанникам, окончившим курс учения с совершенным успехом, при хорошем поведении, присваивается звание ученых мастеров, и они снабжаются аттестациями и бессрочными паспортами.

Воспитанники хорошего поведения, но посредственных успехов в науках выпускаются со званием мастеров и обращаются в те общества, из коих поступили.

Воспитанники, приготовленные к обыкновенному ремеслу, выпускаются на том же основании подмастерьями.

17) Воспитанники не могут поступать на коронную службу, ни получать чинов...

Таким образом, с самого начала своего существования Технологический институт отличался от других столичных учебных заведений своим демократическим составом. Однако и прав, как это явствует из устава, он давал значительно меньше. Только в 1849 г. звания ученых мастеров для выпускников института были заменены званиями инженеров-технологов и технологов-практикантов, хотя сам институт не имел еще прав высшего учебного заведения. Последние он получил лишь по новому уставу 1862 г.

Вторым по времени своего возникновения из русских технологических учебных заведений было Московское ремесленное учебное заведение; преобразовано оно было в

высшее учебное заведение в 1868 г. и получило наименование Московского технического училища. Эти два учебных заведения на протяжении более полувека и готовили кадры для русской промышленности.

Инженеров для государственной службы готовили Петербургский институт путей сообщения, Горный институт, переименованный в 1833 г. из Горного корпуса, Архитектурное училище (1830), Училище гражданских инженеров (1832); на базе двух последних в 1842 г. было создано Строительное училище, получившее официально права высшего учебного заведения в 1851 г.; Практический лесной институт, открытый в 1803 г. в качестве Царскосельской лесной школы, в 1829 г. переименованный в Лесной институт и в 1848 г. получивший права высшего учебного заведения; Московский Константиновский межевой институт. В 1861 г. был открыт Рижский политехнический институт, в 1848 г. — Горьгорецкий институт, в 1864 г. переведенный в Петербург под названием Петербургского земледельческого института; в 1865 г. была открыта Петровско-Разумовская сельскохозяйственная академия. Кроме этого существовали еще военные учебные заведения; Морской корпус, позже развернутый в Морскую академию, Главное инженерное и артиллерийское училище, впоследствии также преобразованные в академии. Все эти учебные заведения сыграли большую роль в создании русской науки о машинах; особенно важную роль в этом направлении сыграли Институт инженеров путей сообщения, Московское техническое училище, Технологический институт и Петровско-Разумовская сельскохозяйственная академия, с которыми нам неоднократно придется встретиться в дальнейшем изложении.

Первой книгой на русском языке по механике машин, написанной в развитие идей Монжа, являются «Записки о приложении начал механики к исчислению действия некоторых из машин, наиболее употребительных», изданные Д. С. Чижевым в 1823 г.

Дмитрий Степанович Чижев (1785—1853) был первым профессором Петербургского университета по курсу чистой и прикладной математики и, таким образом, первым профессором механики университета. Интересно, что на протяжении ста лет, с 1819 г. (год основания Петербургского университета) по 1919 г., кафедрой механики (или, как она называлась, «прикладной математики»)

руководили всего три профессора: академик Д. С. Чижев, академик И. И. Сомов и член-корреспондент Академии наук Д. К. Бобылев.

«Записки» Чижова возникли в результате курса, прочитанного им в Главном инженерном училище. В предисловии автор указывает, что он при составлении своего курса пользовался сочинениями Ашетта, Борнби, Белидора, Ланца и Бетанкура, Кристиана и др. Единственным упоминанием о «простых машинах» в книге является ссылка на перевод «Механики» Франкера, по которому, как указывает Чижев, можно ознакомиться с «начальными машинами, относящимися к статике».

Следуя Ашетту, Чижев начинает свою книгу определением машины: «Машина есть совокупление движимых частей, из коих одни принимают действие двигателя, другие же, изменив скорость и направление оного, передают тем частям, которые должны производить полезное действие, т. е. действие, для которого машина устроена»³.

Однако работа Чижова не является лишь компиляцией: это совершенно новое сочинение и притом с большими педагогическими достоинствами: он, в частности, не удовлетворяется описательным методом, широко принятым в то время, и вводит в изложение элементы расчета. Книга состоит из введения и трех глав, посвященных выяснению понятия о механическом движении, понятия о структуре машины и механике двигателей. Относительно теории рабочих машин и теории передач он отсылает к другим, более полным сочинениям, поэтому по своему характеру работа стоит ближе всего к первым работам Понселе, чем к трудам непосредственных преемников Монжа. Более трудные вопросы Чижев разбирает подробнее, приводит много примеров и задач, доведенных до числового результата.

Учение о структуре машин Чижев начинает с элементарного анализа движений (по Ашетту):

«В машинах наблюдается два рода движений: 1) движения непрерывные; 2) движения попеременные, или возвратные; как те, так и другие могут быть круговые или прямолинейные.

³ Д. С. Чижев. Записки о приложении начал механики... Спб., 1823, с. 5.

Одни только круговые непрерывные движения могут быть совершенно единообразными. Попеременные же движения состоят в периодическом повторении возвратного движения или движения взад и вперед, т. е. в перемене направления, прямо противоположного самому себе; при каждом отступлении назад или возвращении замечается последовательное ускорение и укоснение в движении; и возвратное движение не может иметь места, ежели момент или количество действия, приобретенное движимым телом по предыдущему направлению, не будет вовсе уничтожено; за сим уничтожением следует мгновенный покой, после движения постепенно ускоряется, затем укосняется, снова уничтожается, потом производится в противную сторону и так далее. Очевидно, что от сих последовательных уничтожений движения теряется количество движущей силы тем большее, чем попеременности будут быстрее и чем массы движимых тел будут больше. Итак, со всевозможным тщанием надлежит избегать таких движений, ежели свойство машины то позволяет; если же нельзя их избежать, то надобно по крайней мере уменьшать, сколько возможно, скорость и массу движимых частей; и механики-практики никак не должны выпускать из виду сего главного правила»⁴.

Далее Чижев рассматривает условия равномерного («единообразного») движения, а также действие удара в машинах и утверждает, что «для получения наибольшего, сколько возможно, действия машин требуется, чтобы они устроены были, сколько возможно, так, чтобы движение сообщалось постепенно и нечувствительно, и в случае необходимости в перемене направления или направления движения надобно, чтобы перемена сил происходила неприметно, и, следовательно, тщательно избегать ударов и попеременных движений, ежели свойство машины то позволяет. И потому одно из полезнейших усовершенствований машин состоит в том, чтобы замечать: 1) удары давлениями; 2) попеременные движения, какого бы роду они ни были, движениями круговыми непрерывными; если же нельзя избежать сил попеременных движений, то надобно уменьшать, сколько возможно, скорость движимых тел, особенно в те мгновения, когда

производятся перемены направления в противные стороны»⁵.

Действие машин Чижев измеряет произведением силы веса на высоту подъема, которое он называет количеством движения или динамическим моментом, и приравнивает к «силе движителя» — живой силы

$$F - Ph = Mgh = \frac{M2gh}{2} = \frac{Mv^2}{2}.$$

Принимая затем за единицу веса килограмм, а за единицу пути — метр, он получает «динамическую единицу», равную 1 км. Он указывает, что действие движителей измеряется сравнением с действием силы тяжести.

Определяя «динамический момент» машины в течение некоторого времени, Чижев вычисляет произведение $PHNT$, где N — число динамических единиц, а T — время. Сущность машины, по Чинову, и заключается в преобразовании «динамического момента» $PHNT$ в некоторую другую величину $P'H'N'T'$. При этом первый момент «происходит от движителя, имеющего определенное направление и действующего на известную часть машины; и ни тела, движением коих определяется известное сопротивление»⁶. Во время работы машины происходит потери живой силы на трение, поэтому для создания наилучшей машины надо, чтобы произведение $PHNT$ имело наибольшую величину, а разность между $PHNT$ и $P'H'N'T'$ была возможно меньшей.

Динамическое исследование машин Чижев начинает с теории «живых двигателей»: «Говорят, что Паскаль был изобретателем тачки (тележки с одним колесом). Концы ручек у тачки, где хватается человек, отстоят около 15/10 метра от оси. Средний вес тачки около 30 кг, при перевозке земли, песку и проч. она нагружается обыкновенно до 70 кг. По замечанию Вобана, один человек тачкою может перевезти в сутки 14,79 кубометров земли на расстояние 19,226 м в 500 поездок...»⁷ Он разбирает затем иные работы, выполняемые силой человека. Потом переходит к исследованию силы лошади, воды как движителя; несколько параграфов отводит на освещение

⁵ Там же, с. 9.

⁶ Там же, с. 15.

⁷ Там же, с. 27.

⁴ Д. С. Чижев. Записки о приложении начал механики..., с. 7—8.

вопросов теории гидравлических двигателей, насосов и иных гидравлических машин. Всего на теорию гидравлических машин Чижев отводит 87 страниц (с. 38—125; § 10—41), т. е. половину всей книги.

Параграфы 42—43 посвящены теории паровой машины (с. 125—145). Здесь автор описывает машины Ньюкоммена и Уатта. «Паровые машины,— пишет Чижев,— как простые, так и усиленные приспособляются к многообразным употреблением. От них можно получить всякую силу, начиная от силы одного человека и до силы 1000 лошадей. В Англии особенно они повсюду в наибольшем употреблении. Описание действий, ими производимых, имеет нечто чудесное. С давнего времени они употребляются и у нас, как, например, Кронштадтская паровая машина с 1777 году... но с недавнего только времени употребление их распространяется более и более. Машины сего рода наипрекраснейшего устройства находятся здесь и в особенности на Монетном дворе, так же на Александровской мануфактуре, казенных Чугунном и Литейном заводах, Бердовом заводе и многих других местах казенных и частных.

Паровые машины могут быть употреблены везде, где только можно иметь горючие вещества... и при сем условии они могут заменить машины, приводимые в движение водою, ветром, лошадьми и проч.... Известно также, что за несколько лет пред сим начали они употребляться к тому, чтобы везти за собой барки и другие судна; пароходы или паровые судна имеют повседневное их употребление, особенно в Англии и Америке (а также и у нас...). В таких случаях машины устраиваются так, чтобы они занимали сколько можно меньше места и производили самое наибольшее действие. Равным образом они приспособлены и к паровым повозкам, которые идут без лошадей и могут перевозить большие тяжести или лучше тянуть за собою большое или меньшее число обыкновенных телег или повозок, нагруженных товарами...»⁸ Эта цитата дает достаточно хорошее представление о том, как начиналась наука о машинах в России. Не следует забывать также, что общество освоилось с паровой машиной значительно позже того, как она стала бытовым

инструментом на фабрике, на транспорте и, конечно, в высшей технической школе: ведь еще в пьесе А. Н. Островского «Гроза», написанной в 1859 г., Феклуша жалуется, что уже и «огненного змия стали запрягать: все, видишь, для ради скорости!»

Отдельные параграфы (43 и 44) Чижев посвящает регуляторам («уравнителям паров») и маховым колесам, теории которых изложена по Навье. Оба параграфа написаны достаточно подробно, сопровождаются расчетами и примерами.

Передачам посвящен всего лишь один параграф (46), в котором излагается элементарная теория передач и приведено несколько примеров; сведений о зубчатых колесах в книге нет, на что, впрочем, указывает и сам автор.

Д. С. Чижев учился в тверской духовной семинарии, по окончании которой в 1803 г. поступил в Педагогический институт. В 1808 г. был оставлен для подготовки к профессорскому званию и послан за границу, где находился около трех лет. С 1812 г. начал чтение лекций по механике в Педагогическом институте и в Институте корпуса инженеров путей сообщения. В 1816 г. он был произведен в ординарные профессора чистой и прикладной математики. В 1819 г., по основании Петербургского университета, был избран первым деканом физико-математического факультета и с того же года начал чтение лекций в верхнем офицерском классе Инженерного училища. В 1826 г. Д. С. Чижев был избран членом-корреспондентом Академии наук, а в 1828 г.— академиком Российской академии.

Наиболее значительная часть работы по созданию в России курса прикладной механики выпала на долю преподавателей Института инженеров путей сообщения. Первый курс здесь был составлен Клапейроном⁹. Написан он был на французском языке и издан при институте литографским способом. Дальнейшая работа была выполнена профессорами института П. П. Мельниковым и И. Ф. Ястржембским, которые относятся к группе учеников и сотрудников выдающегося математика и механика М. В. Остроградского.

Михаил Васильевич Остроградский (1801—1862) родился в деревне Пашенной, недалеко от Полтавы.

⁸ Д. С. Чижев. Записки о приложении начал механики..., с. 131—132.

⁹ E. Clapeyron. Leçons de mécanique appliquée, 1828.



М. В. Остроградский

С 1810 по 1816 г. он обучался в Полтавской гимназии с весьма посредственными результатами. Он мечтал о военной службе, но отец решил направить его на гражданскую, более доступную для небогатого помещика, каким он являлся. Но для этого нужен был университетский диплом. После почти полуторагодичной подготовки у частного учителя Остроградский был 27 августа 1817 г. зачислен студентом Харьковского университета, где вскоре проявились его выдающиеся математические дарования: уже в 1818 г. Остроградский сдал экзамен за

трехлетний курс университета и получил соответствующий аттестат. В начале 1819—1820 учебного года он возвратился в университет для «усовершенствования себя по части наук, относящихся к прикладной математике», но к этому времени власть в университете перешла в руки последователей печально известного мракобеса Магницкого, и несмотря на то, что М. В. Остроградский трижды блестяще выдержал экзамен, он не только не получил степень кандидата, но у него отобрали даже его аттестат.

В 1822 г. Остроградский для завершения математического образования отправился в Париж. Здесь он слушал Коши, Пуассона, Ампера, Пуансо и других крупных математиков. Около года он преподавал в одном из Парижских коллежей, а в 1828 г. вернулся в Россию и был избран адъюнктом в Академию наук, хотя и не имел на руках университетского диплома. Его выдающиеся работы очень быстро принесли ему заслуженный успех: уже в августе 1830 г. он был избран экстраординарным академиком, а 21 декабря 1831 г. — ординарным академиком по прикладной математике.

Остроградский был математиком с очень широким диапазоном научных интересов: он занимался небесной и аналитической механикой, прикладной механикой, бал-

листикой, анализом, аналитической геометрией, теорией чисел и другими областями математики, но «большая часть ученых работ Остроградского относится к его любимому предмету — аналитической механике. Он писал по разнообразным вопросам этого предмета: по теории притяжения, по колебанию упругого тела, гидростатике и гидродинамике, по общей теории удара, по моменту сил при возможных перемещениях и т. д. Во всех его работах главное внимание сосредоточивалось не на решении частных задач, а на установлении общих теорий... С именем Остроградского всегда будет связано распространение способа возможных перемещений на системы с освобождающими связями и изложение теорем динамики с помощью рассмотрения вариаций координат, происходящих от изменения произвольных постоянных»¹⁰.

Многогранной была и педагогическая деятельность Остроградского. Началась она в офицерских классах Морского корпуса 1 октября 1828 г. В 1831 г. Остроградский начал читать курс аналитической механики в Институте инженеров корпуса путей сообщения, в том же году был назначен профессором Главного педагогического института, и 40-х годах читал лекции в Главном инженерном и Главном артиллерийском училищах и был назначен главным наблюдателем за преподаванием математических наук во всех военных школах России.

Остроградский поставил преподавание механики в русской высшей школе на небывалую до того времени высоту. В частности, он первым ввел преподавание в России аналитической механики, которую и читал почти тридцать лет. Рукопись его лекций издана литографским способом в Институте инженеров путей сообщения; кроме того, они были записаны его слушателем Н. С. Булаевым в Главном педагогическом институте в 1851—1852 гг. Он непрерывно работал над улучшением курса. В 1860 г. он составил программу, в которой нашли отражение как уровень развития самого предмета, так и настоятельные потребности русской высшей технической школы того времени.

¹⁰ И. Е. Жуковский. М. В. Остроградский. — В кн.: И. Е. Жуковский. Полное собрание сочинений, т. IX. М.—Л., ОНТИ, 1937, с. 390.

Программа по аналитической механике»¹¹ содержит два раздела: 1) механика точки и 2) механика системы. Существенным здесь является уточнение основных понятий механики, приводимое М. В. Остроградским в «Программе» впервые. Если в своих «лекциях» он еще пользовался понятием «ускорительной силы», то в «Программе» почти весь 2-й пункт первого раздела посвящен исследованию ускорения, к которому автор приходит, очевидно, из понятия силы. Уточнение этого понятия проводится в 4-м пункте. В 4-м и 5-м пунктах развивается понятие работы. Впервые в программе представлены вопросы, интересующие техников и, в частности, военных инженеров. Это теория силы трения, исследование движения тел в воздухе с учетом сопротивления среды и исследование полета артиллерийского снаряда. Последнее, впрочем, соответствует научным интересам автора.

«Механика системы» состоит из 17 пунктов. Здесь исследованию весьма важного для техников вопроса о моментах инерции и сопутствующих вопросах посвящено пять пунктов «Программы». По сравнению с «Лекциями» в «Программе» перестроен и порядок изложения и объем излагаемого материала. Интересно, что последние пункты опять-таки посвящены прикладным вопросам: теории баллистического маятника и определению начальной скорости снаряда (п. 22), некоторым вопросам строительной механики (п. 23—24), гидро- и аэростатике и элементам гидродинамики (п. 25—28).

Остроградский не занимался механикой машин, но в результате его интенсивной педагогической и научной деятельности им и его учениками была создана русская школа механики, охватывавшая и различные приложения последней. Его непосредственными учениками были И. А. Вышнеградский, Н. П. Петров, С. В. Кербедз, П. Ф. Ястржембский; к его школе в той или иной степени примыкают Н. Д. Брашман, А. Ю. Давидов, Н. Е. Жуковский, П. Л. Чебышев и многие другие¹². Пожалуй, не найдется ни одного русского ученого, работавшего в

области теории механизмов и машин или на стыке с ней, который бы не был генетически связан со школой Остроградского.

Первые пособия по курсу прикладной механики в широком смысле этого слова принадлежали перу П. П. Мельникова.

Павел Петрович Мельников (1804—1880) в 1822 г. окончил Военно-строительную школу путей сообщения со званием прапорщика и был принят в Институт инженеров путей сообщения, который и закончил в 1825 г. «первым по наукам» и был оставлен при институте для приготовления к преподаванию курса прикладной механики. В 1831 г. Мельников получил звание помощника профессора, а в 1833 г. — профессора по курсу прикладной механики.

Первое пособие по курсу прикладной механики в приложении к железным дорогам («О железных дорогах») Мельников опубликовал в 1835 г. Здесь он рассмотрел ряд вопросов, относящихся к подвижному составу и сопротивлению движению поездов; им было создано много новых терминов, относящихся к общей и специально железнодорожной технике. Курс свой Мельников увязывал с курсами аналитической механики и высшей математики, которые вели академики М. В. Остроградский и В. И. Буныковский. Как писал в своих воспоминаниях Мельников, с Остроградским «мы сходились в одни часы в институте путей сообщения для преподавания: он — рациональной механики, а я — прикладной механики. Самые предметы преподавания вынуждали нас к взаимным объяснениям для согласования наших курсов»¹³.

В 1838 г. в институте был издан литографским способом курс Мельникова, посвященный в основном механике машин, — «Записки практической механики» на 460 листах. Это было наиболее полное пособие, значительно превышавшее и по объему, и по содержанию курс Д. С. Чиждова. В курсе были изложены основы теории двигателей, передаточных и исполнительных механизмов. К преподаванию этого курса Мельников привлёк и С. В. Кербедза (1810—1899) — впоследствии крупного ученого-мостостроителя, почетного члена Петербургской

¹¹ А. Н. Боголюбов, И. З. Штокало. «Программа по аналитической механике» М. В. Остроградского. — В кн.: Историко-математические исследования, вып. XVIII. М., «Наука», 1973, с. 289—294.

¹² Б. В. Гнеденко, И. Б. Погребысский. Михаил Васильевич Остроградский. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 260—265.

¹³ М. И. Воронин. Павел Петрович Мельников. Л., изд. ЛИИЖТа, 1959, с. 8.

академии наук. Вместе с Кербедзом он в конце 1837 г. был командирован за границу для изучения прикладной механики и ее постановки в высших технических учебных заведениях Франции и Германии; по возвращении в Россию ими был составлен подробный отчет по этим вопросам.

Мельников читал курс прикладной механики также в Артиллерийском училище (с 1833 г.) и Горном институте; по его инициативе этот курс был поставлен также в Технологическом институте, Институте гражданских инженеров, где его читал Н. Ф. Ястржембский, и в Инженерном училище, где курс вел С. В. Кербедз.

В 1841 г. П. П. Мельников совместно с профессором Н. О. Крафтом (1798—1857) составил проект Петербурго-Московской железной дороги и после утверждения проекта вместе с Крафтом же руководил ее строительством. Дорога была открыта 1 ноября 1851 г. Это была тогда самая длинная двухпутная железная дорога в мире.

Мельников очень много работал в области теории и практики железнодорожного строительства. В 1858 г. он по рекомендации М. В. Остроградского, В. Я. Буяковского и Б. С. Якоби был избран почетным членом Петербургской академии наук. В 1863 г. он был назначен главноуправляющим путями сообщения, а в 1865 г. — министром путей сообщения, но в 1869 г. был смещен с этой должности как человек, неугодный царскому двору.

Большую работу по созданию руководств по прикладной механике для русской высшей технической школы выполнил Н. Ф. Ястржембский.

Николай Феликсович Ястржембский (1808—1874) родился в Речицком уезде Минской губернии. В 1830 г., окончив Виленский университет по математическому факультету, он поступил в Институт путей сообщения, где в 1832 г. был оставлен репетитором по математике и механике, а в 1837 г. назначен помощником профессора по курсу построения машин и практической механики. Одновременно он преподавал и в других высших технических учебных заведениях. В 1843 г. Ястржембский был утвержден в должности профессора Института инженеров путей сообщения, но через пять лет оставил педагогическую работу и был назначен начальником отделения путей сообщения Могилевского округа. Построил ряд участков дороги, разработал несколько проектов мостов.

Занимался также и литературной работой: в частности, ему принадлежала известная литературная мистификация «Похождения Чичикова, или Мертвые души. Поэма Н. В. Гоголя. Новые отрывки и варианты», опубликованная в «Русской старине» за 1872 г.; однако в 1873 г. Ястржембский признался в авторстве¹⁴.

Первым из учебников Ястржембского был «Курс практической механики» (1837), написанный под значительным влиянием Понселе. Впрочем, некоторые разделы связаны с исследованиями самого Ястржембского; к ним относятся статьи о движениях машин, о двигателях, о сопротивлении строительных материалов.

Книга состоит из двух частей: первая часть посвящена общей теории равновесия и движения твердых и жидких тел, а вторая — общей теории движения машин, теории передач и основам сопротивления материалов. Несколько обособлены от общего содержания книги статьи, относящиеся к гидравлике. Значительное внимание уделяет Ястржембский вопросам прикладной кинематики, в частности теории зацепления.

Более самобытным является следующий курс Ястржембского «Начальные основания общей и прикладной механики». В первой части книги изложены общие начала механики, а во второй — «приложение их к вопросам о составе и способе действия фабричных машин». Нас интересует главным образом вторая часть работы.

Подобно своим предшественникам, Ястржембский начинает анализ машины с расчленения ее на три составные части: приемник, орудие и приводы движения. «Приемник неразлучен, так сказать, с двигателем; оттого часто его самого называют двигателем в том смысле, что он сообщает движение всем прочим частям машины. В том значении каждую часть машины можно назвать двигателем той, которая следует за нею»¹⁵. Последнее замечание очень характерно: выше мы видели уже, что теория пар буквально «посилась в воздухе», но так и не была оформлена вплоть до работ Рело.

¹⁴ Ю. И. Масанов. В мире псевдонимов, анонимов и литературных подделок. М., Изд-во Всесоюзной книжной палаты, 1963, с. 182—193.

¹⁵ Н. Ф. Ястржембский. Начальные основания общей и прикладной механики, ч. 2. Спб., 1846, с. 6—7.

Интересны рассуждения Ястржембского по узловым вопросам механики машин. С большим педагогическим мастерством он разъясняет трудные места, делает обобщения, дает варианты решения задач; так, в третьей главе второй части он предлагает метод создания новых машин:

«Зная род механического производства, выбирают исполнительный механизм и определяют способ действия орудия. При этом главное внимание обращают на то, чтобы действию орудия представлялось всегда одинаковое количество обрабатываемого вещества, если не в каждое мгновение и непрерывно, то, по крайней мере, в продолжение каждого периода. При наблюдении этого условия скорость движения орудия будет или совершенно постоянна или, по крайней мере, будет переменяться периодически и в тесных пределах. Средняя работа, потребляемая орудием в единицу времени, определяется по опыту или вычислением. Разделяя ее на скорость орудия, получают усилие, с которым работает орудие. По известным усилию и скорости определяют размеры орудия. Переходя от орудия к первому за ним приводу движения, определяют его работу по тому соображению, что она должна быть несколько более работы, переданной орудью, потому что часть работы движителя расходуется всегда на вредные сопротивления, от $1/3$ до $1/4$ той работы, какая им передается следующему приводу. На этом основании определится работа привода, а по известной скорости его — среднее усилие и потом размеры привода. Принимая в соображение одну за другою все части, посредствующие между орудием и движителем, найдем, наконец, работу, какую движитель должен доставить приемнику для преодоления всех сопротивлений, и определим состав и размеры приемника»¹⁶.

Систематика приводов Ястржембского представлена в следующем порядке:

1. Приводы для передачи и преобразования движений.
2. Приводы для изменения движения во время хода машины.
3. Приводы для направления движений.
4. Приводы для уравнивания движений.

¹⁶ Н. Ф. Ястржембский. Начальные основания общей и прикладной механики, ч. 2, с. 21.

5. Передача движений посредством мотылей и зубчатых зацеплений.

Систематика эта составлена, несомненно, под влиянием идей Борньи и Понселе; с некоторыми изменениями она дожила в русской учебной литературе до конца XIX в. Особенно тщательно Ястржембский разработал очерк теории зубчатых механизмов. Он суммирует условия правильного зацепления:

«1. Зубцы одного и того же колеса все должны быть равны между собою.

2. На обоих колесах зубцы должны быть размещены одинаково.

3. Высняя форма каждого зубца должна быть симметрическая относительно к средней линии зубца.

4. Зубцы одного колеса должны начинать действовать на зубцы другого колеса только тогда, когда придут на центральную линию.

5. Наконец, кривые поверхности, посредством которых зубцы двух колес действуют друг на друга, должны иметь такую форму, чтобы скорости вращения колес были пропорциональны тем, какие были бы при вращении одного начального круга по другому от взаимного прикосновения»¹⁷. Ястржембский очень подробно разбирает вопрос о вычерчивании зубьев, разъясняя также некоторые специальные случаи зацепления.

По вопросу относительно применения приводов для различных случаев работы машины Ястржембский полагает, что эффективность машин зависит в основном от приемника и орудия, в которых вредные сопротивления (по его мнению) принимают наибольшие значения. Потери же в приводе не играют большой роли в общем балансе работы машины, так как они незначительны. Поэтому при конструировании новой машины следует обращать особенное внимание на удачный выбор исполнительного механизма и приемника машины. Ястржембский утверждает, что и в том и в другом случае вращательное движение является оптимальным.

Следовательно, необходимо полнее изучить приемники и орудия: это и даст достаточные сведения, необходимые для построения всей машины; что касается системы

¹⁷ Там же, с. 98—99.

передач, то ее подбор является уже второстепенной задачей: «К сожалению, в нынешнем состоянии науки подобные решения почти совершенно невозможны. Теоретические исследования и опыт привели к многим важным результатам относительно устройства и способа действия приемников, но исполнительные механизмы до сих пор почти вовсе не исследованы»¹⁸.

Значительное внимание Ястржембский уделяет историческим замечаниям и экскурсам, для которых он отводит иногда целые главы (например, история паровой машины, с. 219—244). Таким образом, он является одним из первых, если не самым первым, русским историком науки, что в определенной степени соответствовало и его литературным интересам.

В четвертом разделе, посвященном исполнительным механизмам, Ястржембский рассматривает насосы, гидравлические прессы, мукомольные мельницы, лесопильные машины. Как указал сам автор в приведенной выше цитате, теоретических исследований рабочих машин в то время, за исключением немногих, просто не существовало, хотя потребность в них и ощущалась.

Пятый раздел посвящен теории приборов.

Мы упомянули об истории науки. Первым русским историком техники был Н. Н. Божерянов (1811—1876). Он преподавал в инженерном морском училище и офицерских классах морского корпуса, где читал курс «паровой механики». Его «Описание изобретения и постепенного усовершенствования паровых машин» (1842) стало первой русской работой по истории техники. Божерянов занимался исследованиями в области теории паровой машины. Постепенно теория паровой машины станет важнейшей составляющей курса прикладной механики. Профессор Института инженеров путей сообщения А. Г. Доброуравов включил в курс прикладной механики элементы тяговых расчетов.

В конце 50-х годов в курсе прикладной механики существенное значение получает кинематика. «По случаю сокращения времени на преподавание средней и новой истории» был вновь введен курс «синематики».

¹⁸ Н. Ф. Ястржембский. Начальные основания общей и прикладной механики, ч. 2, с. 21.

«Синематика имеет целью геометрическое исследование систем, служащих для передачи и изменения движений. Но так как предмет этот будет изучаться в I специальном классе и теми воспитанниками, которые только что прошли статику в V общем классе, то считаю, что бесполезно будет при изложении синематики делать также и применение начал статики для определения усилий, действующих на части машины при данном движении. Это не только укрепит воспитанников в началах статики, но также придаст возможность более тщательно изучить и самые системы, которые будут рассматриваться в синематике.

В курсе о приводах движения машин должно быть изложено:

1. Правила наивыгоднейшего общего состава приводов движения.

2. Правила наивыгоднейшего устройства составных частей или элементов приводов.

3. Правила для определения измерений главнейших элементов приводов и

4. Расчеты наиболее употребляемых приводов.

В первом отделе курса должно говориться о приводах, служащих для преобразования, изменения, прекращения и восстановления движений, и о приводах, уравнивающих движение машин.

Об устройстве элементов приводов и определении их измерений я полагаю говорить в этом же курсе; потому что если бы эти две статьи отнести к курсу построения машин, то явились бы неизбежно повторения, которые отнимали бы время, назначаемое для изложения собственно преподавания предмета.

Накопец статьи об расчетах некоторых наиболее употребляемых систем приводов полезно изложить в этом курсе по той причине, что слушателю легче будет проследить расчет привода, когда устройство его еще совершенно свежо в памяти; да и сверх того этим средством опять избегаются излишние повторения; так, например, определение работы, поглощаемой трением в зубчатом зацеплении, лучше всего изложить вслед за описанием устройства зубчатых колес и реек.

Имея же в виду, что курс о приводах будет предлагаться в I специальном классе, где в то же время излагаются курсы рациональной механики и сопротивления

строительных материалов, я, в видах приспособления курса о приводах к двум вышеозначенным курсам, полагаю, что следовало бы его изложить в следующем виде.

Напомнив о том, что было говорено в статике о силах, их моментах и работе и об разделении сил на движущие и сопротивляющиеся, приступить к изложению статей о трении, что слушателям необходимо знать для статьи о расчетах приводов.

Затем предложить статью о графическом изображении законов движения. Статья эта послужит также и для пополнения пройденного о движении точки в курсе рациональной механики; говорю «пройденного», потому что для предложения механики назначается в неделю более лекций, нежели на чтение курса о приводах.

За эту статью будет следовать статья об общем составе приводов движения и об устройстве элементов приводов. Статья эта будет главнейшей статьей всего курса...

Последняя статья, об расчете употребительнейших приводов, будет иметь целью: а) определение напряжений усилий, действующих на элементы приводов, б) определение отношения между работами усилий, действующих и сопротивляющихся и в) определение размеров элементов привода по данным усилиям на них действующим...»¹⁹

Таким образом, в русской высшей технической школе уже в самом начале 60-х годов была сделана попытка кинетостатического расчета элементов механизмов. Автором цитируемой программы был профессор Института инженеров путей сообщения Н. М. Соколов, курс которого «Практическая механика» был издан в литографии института в 1859 г.

Так обстояло дело в Петербурге. В Москве в 1828 г. была основана Московская практическая коммерческая академия, задуманная как вариант Петербургского практического технологического института, а в 1830 г. — Московское ремесленное учебное заведение, впоследствии развернутое в Московское техническое училище.

Первым московским учебником по курсу механики машин можно считать «Техническую механику, заключающую в себе руководство к познанию свойств машин без помощи высших вычислений» преподавателя коммер-

ческой академии Е. И. Классена. Автор был достаточно хорошо осведомлен о состоянии науки и рекомендовал своим ученикам познакомиться с сочинениями Борньи и Кристиана.

Учебник Классена состоит из двух частей; в первой излагаются некоторые сведения из теоретической механики, вторая посвящена механике машин.

Особенность книги Классена заключается в попытке примирить новую науку о машинах Монжа и его учеников со статикой «простых машин». Автор исходит из предпосылки, что «все сложные машины состоят из простых»; последних он насчитывает шесть: «рычаг, блок, ворот, наклоненная плоскость, клин и шуруп, или винт»; но, в строгом смысле рассматривая, все они состоят только из двух: рычага и наклоненной плоскости». В качестве примера он приводит ветряную мельницу, представляя ее как ворот, приводимый в движение ветром. С той же точки зрения рассматривает он и паровую машину (турбину):

«Ворот, движимый парами, представляют нам паровые машины, устроенные наподобие Зегнерова водяного колеса, в коих вместо воды действуют пары. Но все доселе учиненные опыты относительно сего не были удовлетворительны; главным неудобством считают в них большую растрату паров. Мне кажется, что можно было бы устроить паровую машину с меньшею растратою паров, действующих прямо на колесо; надлежало бы только устроить колесо наподобие паливного, ходящее воздухом плотно к самому паровику или трубе, от него проведенной, доставляющей пары в паровые машины»²⁰. Как видим, идея паровой турбины уже не была новинкой для русских техников, и они всерьез занимались вопросами ее практического устройства.

Учение о структуре машины Классен заимствует у Борньи, но в форме, приданной ему Кристианом: он объединяет группы механизмов, служащие для передачи, преобразования и регулирования движения, под общим названием средних частей машин.

«Весьма немного таких машин, в коих та часть, на которую движущая сила действует непосредственно, имеет то самое направление, ту скорость и тот род движения,

¹⁹ ЦИА, ф. 447, оп. № 1, д. 148 («О рассмотрении программ...»)

²⁰ Е. И. Классен. Техническая механика... М., 1834, с. 162.

которые требуются по цели машины или при коих эффект действия самый большой. По сей причине весьма нередко нужны бывают в машинах такие части, которые изменяют движение; их называют средними частями и разделяют на два рода: одни служат для того, чтобы передавать движение с переменою скорости или без перемены оной; другие для того, чтобы управлять движением и уравнивать оное.

Средние части, служащие для передачи движения с переменою или без перемены направлений... суть: зубчатые колеса, зубчатые бруски или рамы, курбы, или колебчатые оси, криволинейные наклоненные плоскости (кулачки), веревки, ремни и цепи»²¹.

Как видим, Классен выразил и некоторые новые мысли. Во-первых, он указал на преобразование скоростей, на котором (как это было показано выше) Виллис построил свою теорию механизмов. Во-вторых, он обратил внимание на состав «средних частей» машин. По Классену, они тождественны не элементарным машинам Монжа, а звеньям механизма.

В книге Классена есть и несколько статей кинематического содержания, в частности элементарная теория зубчатых зацеплений; он излагает также способы вычерчивания «кулаков» зубчатых колес.

О «средних частях» машин, служащих для «уравнивания движения», Классен пишет:

«Если при какой-либо машине моменты силы и тяжести не постоянны или если не оба изменяются по одному и тому же закону, то происходит неравность в движении. В некоторых случаях принимают сие за дурное качество, но в большей части оных теряет эффект машины столько от сего, что стараются употребить все возможные средства для уравнивания движения. К сим средствам относятся: маховые колеса, улитки, эксцентрические кривые поверхности, изменяющиеся тяжести, ветряницы и конические маятники. По краткости и цели сего сочинения мы опишем только маховые колеса и конические маятники»²². Книга завершается разделами, посвященными вопросам сопротивления материалов. Не лишено интереса указание Классена о том, что «поелику

при построении большей части машин употребляется дерево, то на сей материал должно обратить особенное внимание»²³.

В 1834 г. в Московском университете прикладную математику (которая в сущности являлась курсом аналитической механики с дополнением некоторых статей прикладной механики) начал читать профессор Н. Д. Брашман. Николай Дмитриевич Брашман (1796—1866) родился в Чехии, около г. Брно. По окончании Венского политехникума он учился в Венском университете и в 1823 г. переехал в Россию, где сперва преподавал математику в петербургском Петропавловском немецком училище, а с 1825 г. — в Казанском университете.

В Московском университете Брашман читал механику, оптику и ряд математических дисциплин. Как инженер, он обращал внимание своих слушателей на практические приложения механики и даже в курсе теоретической механики вводил целые разделы из области прикладной механики. Он усиленно рекомендовал своим ученикам технические темы для самостоятельной работы и организовал в Московском университете кафедру практической механики, которую получил его ученик А. С. Ершов. Одним из его любимых учеников был П. Л. Чебышев. Н. Д. Брашман (вместе со своим учеником А. Ю. Давыдовым) организовал Московское математическое общество и был его первым президентом.

Н. Д. Брашман сам не работал в области прикладной механики и не оставил работ в этом направлении, но сыграл большую роль в деле постановки исследовательской и педагогической работы в этой области. В 1859 г. он издал курс теоретической механики, очень обстоятельный и написанный на высоком научном уровне; тематика его статей в определенной степени отражает влияние венской научной школы. Но, как воспитатель молодых ученых, он приложил много сил и стараний к созданию в России исследовательского направления в области прикладной механики. Его ученик А. С. Ершов писал о нем: «В этот день (13 апреля 1843 г.) я окончил последний из своих экзаменов для получения степени магистра — экзамен из прикладной математики... После экзамена я говорил с Брашманом о моем будущем. Он с участием вызы-

²¹ Е. И. Классен. Техническая механика..., с 167.

²² Там же, с. 219.

²³ Там же.



Н. Д. Брашман

Значительное время он уделил практическому ознакомлению с фабриками и заводами.

В 1844 г. А. С. Ершов защитил магистерскую диссертацию на тему «О воде, как о двигателе» и приступил к чтению курса практической механики на физико-математическом факультете Московского университета. С 1845 г. он читал также практическую механику и начертательную геометрию в Московском ремесленном учебном заведении. В 1859 г. он был назначен директором этого училища и оставил преподавание в университете.

В 1854 г. А. С. Ершов опубликовал часть своего курса практической механики — «Основания кинематики, или элементарное учение о движении вообще и механизме машин в особенности». Это руководство было первой книгой на русском языке, специально посвященной проблеме технической кинематики.

«Практическая механика рассматривает машины с трех сторон, — пишет Ершов, — со стороны передачи и изменения движения, со стороны принятия и передачи ра-

вал меня на новую работу по практической механике, советовал иметь в виду не одну учительскую должность, но и ту пользу, которую я могу принести Москве и самому себе приложением своих знаний»²⁴.

Значительную роль в развитии технического образования в России сыграл Александр Степанович Ершов (1818—1867). По окончании Московского университета он был отправлен за границу для усовершенствования своих знаний в области практической механики. В Париже он слушал лекции Понселе, Морена, Беланже, Оливье.

боты сил, приводящих их в движение, и, наконец, со стороны построения.

Отсюда происходят три обширные части науки:

1) передача и изменение движений, или механизм машин, 2) силоизмерение, теория двигателей и динамическая теория машин и 3) построение машин, основанное на теории сопротивления материалов. Долгое время рассматривались машины только со второй точки зрения, т. е. как орудия для принятия и передачи работы сил. Превосходные и обширные труды Навье, Кориолиса, Монзеля, а особенно Понселе относились к этой части нашей науки. Любопытнейшее изучение механизма машин долго упускалось из виду; а это изучение всего лучше вводит нас в область машиноведения, в этот особый мир, созданный изобретательностью и трудолюбием человека»²⁵.

В начале второй половины XIX в. большинство механиков придерживались классификации Виллиса. Школа Виллиса разработала ряд вопросов кинематики весьма глубоко, но создать такую классификацию, которая была бы пригодной для практического использования, она не смогла. Поэтому у последователей Виллиса получился разрыв между кинематикой и ее приложениями к машинам, который в конце концов привел к тому, что представители этой школы начали излагать кинематику почти без всякой связи с приложениями, а приложения превратились в сборники примеров, иллюстрирующих классификационные принципы того или иного автора. Тогда же определилась и разница во взглядах на методику преподавания в технических учебных заведениях. Во французских школах уровень преподавания теоретических наук был высоким, а преподавание прикладных наук было по-



А. С. Ершов

²⁴ Н. А. Любимов. Воспоминания об А. С. Ершове. — В кн.: Отчет Императорского технического училища за 1869 год. М., 1870, с. 4.

²⁵ А. С. Ершов. Основания кинематики. М., 1854, с. VII—VIII.

ставлено слабее. Русская школа в этом отношении ближе стояла к немецкой, в которой теоретическое преподавание увязывалось с технической практикой, но имела и свою характерную особенность: не удовлетворяясь обучением студентов в учебных мастерских, она стремилась как можно ближе стать к производству, к реальной фабрично-заводской практике.

В этом направлении и написан учебник А. С. Ершова. Ершов старался слить теорию с практикой и показать, как следует применять теорию в реальных механизмах. В качестве исходной классификации он принимает ту, которую предложил Ашетт. Факт этот весьма интересен, так как Ершов слушал почти всех ученых, работавших тогда в области прикладной механики, и был знаком с различными классификационными системами из первых рук. Объясняется это практической направленностью работы. Кроме того, принцип Монжа все же объективно отражал родовой признак, присущий механизмам. И Ершов, который интересуется классификацией не как самоцелью, а как средством для лучшего познания механизмов, очевидно после размышления, примкнул к этой школе.

О практической направленности своих исследований в области теории механизмов говорит сам Ершов:

«Итак, сведения о механизме, бывшие прежде уделом составителей автоматов, планетариев и башенных часов, приведены теперь в систему и вошли в науку. Они необходимы для составления и быстрого устройства машин, нередко поражающих нас своей сложностью, а равно и для критического суждения о способах, употребленных для передачи и преобразования движений. Нередко для достижения одной и той же цели употребляются различные средства...

Теория механизмов должна решить, в каком случае каждый из этих способов употребляется, и потом показать, как избранный способ должен быть осуществлен и по какому закону он будет передавать и изменять движения. Классификация частей машин у нас основана на понятиях Монжа, т. е. на различении видов движений по форме и по направлению»²⁶.

²⁶ А. С. Ершов. Основания кинематики, с. XII—XIII.

Несмотря на то что классификационные принципы Ершов заимствовал у Монжа, его механизмы имеют мало общего с распылчатыми и неясно определенными «элементарными машинами» и больше напоминают механизмы Виллиса. У последнего, очевидно, заимствована Ершовым и мысль о дальнейшем разложении механизма:

«Простые механизмы, рассмотренные нами в предыдущих параграфах, состоят из двух частей: действительной и страдательной, или приводящей в движение и приводимой в движение, и мы показали там, как надобно соединять эти части для того, чтобы приводить требуемое отношение между числами оборотов при всяком относительном положении осей вращения.

Но это отношение может быть такого рода, что ему неудобно или даже невозможно удовлетворить одним простым соединением двух частей, а понадобится целый ряд таких соединений, составляющих сложный механизм»²⁷.

Задачей «теории механизма» (опять-таки термин Виллиса), по Ершову, является изучение движений. Она «рассматривает сперва передачу, потом преобразование, далее совокупление многих частей, с целью передачи движений на большие расстояния или с целью значительного изменения скорости, и наконец обращает внимание на составление движений, т. е. на тот случай, когда одна и та же часть машины, кроме общего движения с другою, имеет еще свое собственное, относительное движение. Цель этого исследования состоит в объяснении так называемых дифференциальных движений»²⁸. Здесь же Ершов указывает, что его сочинение в целом «относится к азбуке машиноведения, без которой, впрочем, нельзя понимать ни состава, ни действия машин». По его мнению, следует различать понятия передачи и преобразования движений, так как при передаче движение только переносится от одной части машины к другой, изменяются лишь скорости и направления. Все же три характеристики преобразований — скорость, направление и вид — являются в общем случае переменными. Таким образом, в принцип Монжа вносится существенное уточнение, которое нужно было Ершову для введения единства иссле-

²⁷ Там же, с. 164—165.

²⁸ А. С. Ершов. Основания кинематики, с. XIV.

дования подобных механизмов. При этом становится ясной ошибка Виллиса в его формулировке понятия «чистого механизма». Последовательно провести это понятие на протяжении всего своего исследования не решился и сам Виллис: он включил в свою систему целый класс гибких передач, что противоречило его предположению об обязательной жесткости звеньев «чистых механизмов». У Ершова гибкие звенья входят в состав механизмов наравне с жесткими.

В теории зубчатых зацеплений Ершов исходит из следующих положений:

«1. Зубцы на одном и том же колесе должны иметь одинаковую толщину.

2. Шаги на обоих зацепляющихся колесах должны быть равны между собой, а иначе и при правильной форме зубцов ход колес не будет равномерен.

3. Каждый зубец должен быть ограничен одинаково с обеих сторон.

4. Кривые линии, ограничивающие профили зубцов, должны быть такого рода, чтобы движение передавалось от одного колеса к другому, по тому же самому закону, по которому один цилиндр вращает другой одним трением, т. е. нужно, чтобы скорости на начальных окружностях двух колес были всегда равны между собой и чтобы поэтому отношение между угловыми скоростями оставалось всегда равным обратному отношению радиусов начальных кругов». Интересно второе условие, которое заменяло отсутствующее еще понятие модуля. Раздел теории зубчатых зацеплений изложен Ершовым образцово.

Значительное внимание уделил Ершов также вычерчиванию и расчету кулачковых механизмов. Одним из первых он предложил применять для исследования и демонстрации движений приборы. В экспериментальных методах исследования движений Ершов сохраняет несомненный приоритет, ибо эксперименты Чебышева были опубликованы позже. Ершов рассмотрел следующие приборы: цилиндр, приводимый в движение с помощью пружины или гири и служащий для изучения «быстрых» движений, круг, вращающийся равномерно вокруг оси, бесконечную бумажную ленту, охватывающую два цилиндра, один из которых является ведущим. Все эти приборы очень элементарны, но они были первыми приспособ-

лениями механических лабораторий высших технических школ, с помощью которых были выполнены первые же экспериментальные исследования. Ершов рассматривает также (§ 28) графический способ определения отношения скоростей точек механизма.

В книге Ершова нет «простых машин», поскольку они совершенно не соответствуют его концепции теории механизмов. Напомним, что некоторые его современники, в том числе Фейерберн и Вейсбах, считали, что «простые машины» следует положить в основу учения о машинах.

Кроме «Оснований кинематики» А. С. Ершов написал ряд статей, посвященных вопросам технического образования и промышленного развития России. Много труда отдал Ершов и преобразованию Московского ремесленного учебного заведения в одну из лучших русских высших технических школ. Правда, завершено было это преобразование уже после кончины Ершова, в 1868 г.

Борясь за развитие русского машиностроения, А. С. Ершов указывал, что мастерские технической школы играют и должны играть важную роль в деле повышения общей технической культуры русского машиностроения. В училище он поставил экспериментальные методы исследования технических задач и создал ряд учебных лабораторий и кабинетов. Идеи Ершова были развиты его учениками в Московском высшем техническом училище, одним из основателей которого он является.

Создание русской технической культуры и науки проводилось не только в стенах высших технических школ: важную роль в этом отношении сыграли и русские университеты и Академия наук. Еще в 40-х годах XIX в. возникла мысль о подготовке техников в университетах. Некоторые профессора начали читать в университетах курсы «по части практической механики и технологии». Так, в Харьковском университете профессор И. Д. Соколов²⁹ читал курс теории машин по сочинениям Навье и Понселе. В 1839 г. при Петербургском университете было открыто реальное отделение, задачей которого являлась

²⁹ Иван Дмитриевич Соколов (1812—1873). С 1840 г. — профессор механики Харьковского университета. В 1841—1847 гг. читал публичные лекции по механике. В конце 60-х годов — ректор Новороссийского университета, затем помощник попечителя учебного округа в Казани.

подготовка преподавателей технических наук. Курс прикладной механики в 1841—1843 гг. читал Кербедз. В 1843 г. это отделение было упразднено, но затем в 1849 г. восстановлено и просуществовало еще два года. Прикладную механику в это время начал читать П. Л. Чебышев.

С именем Чебышева связано становление самостоятельной русской школы в области механики машин. Время для научной деятельности не было легким. И наука, и образование в эти годы находились в руках людей в отношении науки, по образному определению М. Е. Салтыкова-Щедрина, «свежих», но эти «свежие» люди принесли много горя русской культуре, хотя бы потому, что сами ни к какой науке и культуре никакого отношения не имели, да и иметь-то не могли, по существенной своей малограмотности.

А в годы царствования Николая I душились даже проблески любой мысли. Еще памятно было восстание декабристов. В 1847 г. был арестован воспитанник Академии художеств Т. Г. Шевченко, и еще через два года ушел на каторгу выпускник Главного инженерного училища Ф. М. Достоевский. На все учебные заведения легла тяжела рука Николая I, и нужны были большое самоотречение и большая сила воли, чтобы заниматься наукой в таких условиях. Недаром такой талантливый инженер и профессор, как Ястржембский, предпочел оставить высшую школу и обратиться к практической деятельности. Надзор за преподаванием не пропускал даже мелочей. Известен случай, когда на одном из проектных чертежей была изображена для наглядности фигура человека в цветном фраке и цилиндре. Николай зачеркнул эту фигуру, «начертав» на чертеже: «Это что за республиканец!» После этого в Институте инженеров путей сообщения был издан приказ, разрешающий изображение масштабных фигур только в военной форме.

Во всех учебных заведениях преподаватели должны были представить перед началом занятий точные программы с указанием сочинений, которым они будут следовать в своих курсах. Никаких изменений не допускалось: деканы обязаны были посещать лекции и о малейших отступлениях от программы доносить ректору, «хотя бы отступление и было безвредным».

Отрицательно сказалось на развитии научной работы

в области техники и положение русской частной промышленности, которая в значительной степени находилась в иностранных руках или под значительным влиянием иностранного капитала. Заграничные специалисты, руководившие промышленными предприятиями, всячески старались не допускать русских техников к ответственным работам. Несколько более благоприятно относились к инженерам отечественной выучки государственные предприятия, но их было немного. Таким образом, у русских ученых-техников не было базы для научной работы и для совершенствования в своей специальности им приходилось выезжать за границу.

Еще одним обстоятельством, тормозившим развитие научной мысли в области теории машиностроения, было само положение науки о машинах. Генетически она возникла из одного из разделов начертательной геометрии и развивалась вместе с рабочими машинами, определив основной ход промышленного переворота. Только тогда, когда рабочие машины определили развитие всех основных отраслей производства и когда началось производство машин при помощи машин, дальнейшее развитие теории машин стало настоятельной потребностью. Начинается интенсивная научная деятельность в области изучения машин: из общей науки о машинах выделяется ряд специальных предметов и уточняется та область, в которой работает теория механизмов и машин. Это явилось результатом требований отечественного машиностроения.

Экономическое развитие России в середине XIX столетия отражало всю противоречивость хозяйственного уклада страны со средневековой, полуфеодальной структурой общественных отношений. В стране бурно развивался капитализм, с каждым годом росло число фабрик и заводов, прокладывались пути сообщения. Промышленный переворот, двигавшийся в восточном направлении со средней скоростью 15 км в год, проник в пределы Российской империи и стимулировал здесь ломку устоявшихся общественных отношений. Несколько притихшая к началу столетия торговая активность русских купцов к середине века опять возросла. Поиски новых рынков сбыта заставили обратить особое внимание на Ближний Восток и Балканы, на Среднюю Азию и бескрайние просторы Сибири. Вопрос о путях сообщения приобрел

теперь крайнюю остроту. Железнодорожная лихорадка, очень напоминающая по своим методам эпоху первоначального накопления в некоторых странах, и ликвидация феодальных общественных отношений — освобождение крестьян от личной зависимости (и от земли) в 1861 г. — расчистили дорогу для развития капитализма.

Одновременно происходило и перевооружение русской промышленности. Академик С. Г. Струмилин приводит таблицу³⁰, характеризующую рост механовооруженности русской промышленности:

Годы	Ввоз оборудования в Россию (в тыс. руб. серебром)		Производство машин в России (в тыс. руб. серебром)
	Машины	Инструмент	
1811—1820	177	1 792	Данных нет
1821—1830	487	2 712	»
1831—1840	4 111	4 321	2 750
1841—1850	11 747	4 199	4 860
1851—1860	48 080	36 433	36 433

«Машинный инвентарь ввозился для оборудования фабрик, а ручной инструмент — главным образом для снабжения мануфактур. И не случайно в 1811—1820 гг. импорт инструмента в 10 раз превышал ввоз машин, а в 1851—1860 гг. уже, наоборот, ввоз машинного оборудования в 7—8 раз превысил импорт ручного инвентаря. Этот сдвиг в пропорциях означал решительную победу машинного труда над ручным, а вместе с тем и фабрики над мануфактурой»³¹. Кроме того, бросается в глаза перелом в экономике в 50-х годах, характеризующийся развитием отечественного машиностроения; к 1860 г. стоимость отечественных машин почти уравнивается со стоимостью машин, ввезенных из-за границы.

Следует полагать, что цифры, приведенные С. Г. Струмилиным, не совсем точны, так как едва ли в них вошли

³⁰ С. Г. Струмилин. История черной металлургии в СССР, т. I, с. 407—408.

³¹ Там же, с. 408.

машины, строившиеся заводами и предприятиями горно-рудной и угольной промышленности «для себя», вообще процесс технико-промышленного преобразования страны был сложнее и многостороннее, чем это представляется на первый взгляд. Континентальная блокада Наполеона и экспортная политика английского правительства в 20—40-е годы вызвали рост русского машиностроения еще в первой четверти XIX в.; к середине 40-х годов этот рост замедлился, но в начале второй половины века он ускори́лся с новой силой. «За 1851—1861 гг. число механических заводов выросло в 5,6 раза, число рабочих — в 9,2 раза и продукция — в 15,2 раза. Среднегодовой прирост продукции свыше 30% — это показатель воистину революционных темпов развития нового общественного уклада. Ни до 50-х годов, ни после, вплоть до Великой Октябрьской революции, мы не знаем подобных темпов развития»³².

Качественный и количественный рост русской промышленности в середине XIX в., естественно, сопровождался и повышением требований к техническим кадрам. Техников для фабрично-заводской промышленности в России готовили в то время Петербургский практический технологический институт и Московское ремесленное учебное заведение, причем обе эти школы не имели высших учебных заведений. В частности, технологический институт выпускал «ученых мастеров» при шестилетнем сроке обучения (в 1-й класс принимались 13—15-летние подростки). В институте преподавали арифметику, алгебру до уравнений, геометрию, давали некоторые понятия о практическом измерении Земли и пр. «Нужные части прикладной механики» читались на пятом году обучения, и с 1840 г. по предложению профессора Н. Ф. Ястржембского был введен на шестом году обучения курс построения машин как отдельный предмет. Подобным был и учебный план Московского ремесленного учебного заведения.

Эта подготовка не была достаточной, и уже в середине века встал вопрос о повышении уровня преподавания в этих школах.

Таким образом, к этому времени сложились в России как бы три совершенно отдельные образовательные си-

³² Там же, с. 406.

стемы, имевшие отношение к построению машин, а следовательно, и заинтересованных в прикладной механике как предмете преподавания. Это были университеты, собственно их физико-математические факультеты, на которых преподавание этого предмета было поставлено с самого начала столетия, затем высшие технические учебные заведения, готовившие инженеров с офицерскими степенями для путей сообщения, горной промышленности и строительства; сюда же можно отнести и некоторые военные и военно-морские учебные заведения. К последней группе относились технологические институты — Петербургский и Московский («ремесленное учебное заведение»), готовившие техников для частной фабрично-заводской промышленности и дававшие своим воспитанникам минимум прав. Кроме того, русская промышленность в значительной степени находилась в иностранных руках, и заграничные специалисты, стоявшие зачастую во главе русских предприятий, старались не допускать русских техников к работе.

Поэтому положение для научной работы в области технических наук отнюдь нельзя было назвать благоприятным.

И, несмотря на это, русские ученые в области технических наук не только быстро встали на уровень своих западноевропейских коллег, но очень скоро заняли и ведущие места в ряде направлений науки о машинах. Одной из причин этого было то, что сразу же после Остроградского ведущую роль в развитии механики машин приняли на себя математики.

Математика в России как наука развивалась в XIX в. Эйлер не оставил после себя учеников — таких, которые могли бы продолжить и разработать высказанные им идеи. Сам он сделал чрезвычайно много, вероятно, больше, чем какой-либо другой ученый XVIII (и не только XVIII) в. Однако школы после себя он не оставил, и Остроградскому все пришлось начинать сначала.

Сам Остроградский был, несомненно, математиком-прикладником и всю жизнь работал совместно с техниками и учил их. Это не только отразилось на его творчестве, но и на творчестве его ближайших учеников и слушателей. Он также не создал настоящей математической школы, но оказался зачинателем большой школы в области прикладных наук. Его ученики были выдающимися

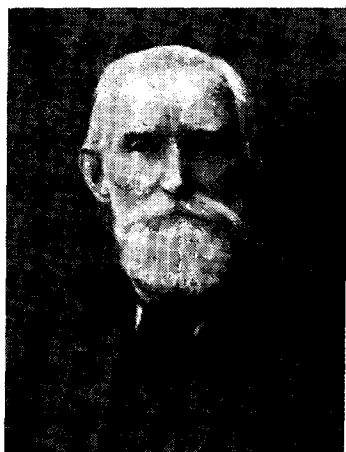
учеными-инженерами и сделали многое, в частности и в направлении науки о машинах.

Подобную роль выполнил в Московском университете Н. Д. Брашман, инженер по образованию, который поставил в университете преподавание прикладных наук так, что смог заинтересовать своих слушателей. Интересно, что после Брашмана на протяжении полувека в Московском университете особенно высоко была поставлена именно прикладная математика.

Один из учеников Брашмана, П. Л. Чебышев, создал Петербургскую математическую школу. Он же первым применил к задачам механики машин математические методы и преобразовал ее из науки описательной в науку расчетную.

Пафлутий Львович Чебышев (1821—1894) родился в с. Окатово Калужской губернии. Первоначальное образование получил в семье. В 1837 г. поступил на второе отделение философского факультета Московского университета. В 1841 г., будучи еще студентом, получил серебряную медаль за сочинение «О числовом решении алгебраических уравнений» (студент, оцененный золотой медалью, следа в математике не оставил).

В том же году Чебышев окончил университет, а в 1843 г. был подвергнут испытаниям на степень магистра математических наук. В соответствии с существовавшими правилами магистранту задавались (по жребию) два вопроса, на которые он должен был ответить основательно и подробно. Соответственно докторанту задавались четыре вопроса; от магистра требовалось историческое знание предмета, а от доктора — критическое. В 1846 г. Чебышев защитил диссертацию на тему «Опыт элементарного анализа теории вероятностей». В 1847 г. он переехал в Петербург и приступил к работе в Петербургском



П. Л. Чебышев

университете в должности адъюнкта. В 1849 г. он защитил диссертацию на тему «Теория сравнений» и получил степень доктора математики и астрономии, а через два года был избран экстраординарным профессором Петербургского университета.

Математические исследования П. Л. Чебышева были тесно связаны с его интересами в области практической механики (очевидно, в этом сказывалось влияние московской школы Н. Д. Брамана). Во время своей первой заграничной командировки в 1852 г. (это было связано с подготовкой им курса практической механики) он уделил много внимания вопросам прикладного характера. Его интересовала теория крыла ветряной мельницы — в Лилле он ознакомился с ветряными мельницами и поставил задачу о наивыгоднейшей форме крыла. В Париже он интересовался Консерваторией искусств и ремесел, в Метце — водяными мельницами. Он осматривал машиностроительные заводы близ Метца, бумажные фабрики в Ангулеме, оружейный завод в Шателро. В Лондоне он также посетил много фабрик и заводов, главным образом машиностроительных, и познакомился с Сильвестером и Кэйли, с которыми у него оказалось немало общих научных интересов.

В 1853 г. Чебышев был избран адъюнктом, а в 1859 г. — ординарным академиком Петербургской академии наук по кафедре прикладной математики. Он был избран во многие иностранные академии, в частности, в 1860 г. — членом-корреспондентом Французской академии наук, а в 1874 г. — ее иностранным членом.

Кроме основной работы — в Петербургском университете и Академии наук — Чебышев с 1855 г. был действительным членом Артиллерийского отделения Военно-ученого комитета, а с 1856 г. — членом Ученого комитета Министерства народного просвещения.

Всему творчеству П. Л. Чебышева была присуща органическая связь теории с практикой — возможно, это было следствием его детских впечатлений: у него была больная левая нога, что связывало его подвижность, и он ходил, опираясь на две палки. Он с детства привык к усидчивости; устройство различных приборов и механизмов было его первой игрой. Это осталось у него на всю жизнь: в сущности, все его математические работы были основаны на запросах практики. В статье «Черчение гео-

графических карт» он сам пишет об этом: «Сближение теории с практикой дает самые благотворные результаты, и не одна только практика от этого выигрывает, сами науки развиваются под влиянием ее, она открывает им новые предметы для исследования или новые стороны в предметах, давно известных. Несмотря на ту высокую степень развития, до которой доведены науки математические трудами великих геометров трех последних столетий, практика явно обнаруживает неполноту их во многих отношениях; она предлагает вопросы существенно новые для науки и, таким образом, вызывает на изыскание совершенно новых методов. Если теория много выигрывает от новых приложений старой методы или от новых развитий ее, то она еще более приобретает открытием новых методов, и в этом случае наука находит себе верного руководителя в практике»³³.

Свою педагогическую деятельность в Петербургском университете Чебышев начал с чтения курса практической механики. Дело в том, что университет с 1839 по 1852 г., с небольшим перерывом, имел в составе своего физико-математического факультета «реальное» отделение, задачей которого была подготовка преподавателей для высших технических учебных заведений. Курс практической механики здесь читал С. В. Кербедз, а в 1849—1851 гг. — Чебышев (практическую механику он читал также в Александровском лицее). Кроме этого курса Чебышев в разное время читал высшую алгебру, сферическую тригонометрию, аналитическую геометрию, теорию чисел, интегральное исчисление, теорию вероятностей, теорию эллиптических функций. К чтению своих лекций Чебышев относился с педантичной строгостью, лекции никогда почти не пропускал, никогда на них не опаздывал и ни одной лишней минуты после звонка не оставался в аудитории, хотя для этого приходилось прерывать лекции иногда на полуслове. Недоконченный на какой-либо лекции вывод всегда начинал на следующей лекции с самого начала, если только эта лекция не была продолжением предыдущей. Всякой сколько-нибудь сложной выкладке предпосылал разъяснение ее цели и хода в общих чертах, а затем производил вычисление на

³³ П. Л. Чебышев. Полное собрание сочинений, т. V. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1951, с. 150.

доске, большей частью молча, предоставляя студентам следить за ним глазами, а не ухом.

Выкладки делал довольно легко и настолько подробно, что следить за ним было легко. Во время лекций Чебышев часто делал отступления... сообщал свои взгляды и разговоры с другими математиками по затронутым на лекции вопросам, выяснял сравнительное значение и взаимную связь между различными вопросами математики. Эти отступления очень оживляли изложение, давали отдых напряженному вниманию слушателей и возбуждали интерес к изучению предмета в более широких рамках...

Одной из незабвенных заслуг Чебышева как учителя русских математиков было то, что он своими работами и указаниями в ученых беседах наводил своих учеников на плодотворные темы для собственных изысканий и обращал их внимание на такие вопросы, занятия которыми всегда приводили к более или менее ценным результатам»³⁴.

Значение П. Л. Чебышева для русской науки было чрезвычайно большим: он был общепризнанным главой Петербургской математической школы и мог влиять на развитие математики как науки в России, ибо почти на всех университетских кафедрах были его ученики или единомышленники. Он был очень добрым и скромным человеком. Когда дело касалось интересов его учеников (как, например, в деле о приоритете Липкина³⁵), он всегда им помогал.

Чебышев был человеком с широкими интересами: прекрасно знал русскую и французскую литературу, занимался философией, любил поговорить о текущих делах и академических новостях.

Умер П. Л. Чебышев в возрасте 73 лет 26 ноября 1894 г., сидя за своим письменным столом, от паралича сердца.

С Чебышева начинается большая русская наука в области механики машин. Более того, он оказал существенное влияние и на мировую историю науки: в сущности лишь после его работ механика машин получила возможность использовать математический аппарат.

³⁴ А. Н. Крылов. Собрание трудов, т. I, ч. 2. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1951, с. 116—117.

³⁵ Об этом см. ниже.

Вклад Чебышева в механику машин начинается с того курса, который он прочитал в Петербургском университете. Курс этот, рассчитанный на три семестра, читался им вплоть до 1856 г. В первом семестре он читал раздел «Об органах преобразования движений» с полной теорией построения зубчатых колес (по Оливье), а также значительную часть второго отдела «О передаче движений». Здесь он давал общий способ вычисления количества работы, выводил уравнение, показывающее потерю работы от вредных сопротивлений, излагал законы трения и жесткости веревок и разбирал теорию вредных сопротивлений. Во втором семестре изучались трение в блоках, винтах, зубчатых колесах, неравномерность хода машин и их регулирование, теория маховика, теория удара. Третий семестр посвящался изучению теории двигателей, гидравлических колес, турбин, а также исследованию некоторых других гидравлических машин. В качестве рукоподсти Чебышев рекомендовал сочинения Понселе, Кориолиса, Кристиана, кроме этого, курс паровых машин Памбура, а также (для третьего семестра) сочинение Памбура «Резюме уроков, прочитанных в Школе мостов и дорог».

Подобного содержания была и программа курса практической механики, читанного Чебышевым в Александровском лицее. Последовательность вопросов в общем соответствует известному курсу Понселе: общая теория машин, учение о силах трения и об их определении, регулирование хода машин, кинематические статьи о преобразовании и передаче движения (особенное внимание уделялось теории зубчатых зацеплений) и, наконец, теория двигателей, заканчивавшаяся учением о паровой машине. Особенности обоих курсов заключаются в большой насыщенности практическими приложениями, разобранными на конкретных примерах, и в подчиненном положении кинематики — характерная особенность работ Понселе, которые были положены Чебышевым в основу читаемых им курсов. Это тем более интересно, что собственные интересы Чебышева лежали именно в области кинематических исследований.

Важнейшим направлением исследований Чебышева в области кинематики было создание им теории шарнирных механизмов, значение которой для развития теории машин было осознано значительно позже.

Шарнирные механизмы впервые появились в Западной Европе в составе машин около XII в. Развивались они очень медленно, так как изготовление шарниров для техники XII—XVIII столетий было делом чрезвычайно трудным. Декарт в своей «Геометрии» указал на то, что некоторые механические кривые можно выразить с помощью алгебраических уравнений и можно начертить при помощи инструментов, состоящих из звеньев, связанных между собой. Инструменты эти, очевидно, можно было бы отнести к группе шарнирно-рычажных механизмов.

Важное значение для теории шарнирных механизмов имело изобретение механизмов для приближенного воспроизведения прямой линии. Это изобретение было необходимо для создания приемлемых конструкций паровых машин. Дело в том, что общепринятым приводом пареоатмосферных машин Ньюкомена (а затем и паровых машин Уатта) была передача через коромысло, качавшееся около некоторой точки закрепления. Один конец коромысла соединялся с рабочим органом (шахтный насос для машин Ньюкомена), а второй — со штоком поршня. Шток теоретически должен был двигаться по прямой линии, а конец коромысла — по дуге окружности. До тех пор пока в зазор между поршнем и цилиндром входил большой палец руки (а это было обычным явлением для техники XVIII в.), особенного неудобства это обстоятельство не представляло: повысившаяся точность изготовления и припасовки создала трудности с обеспечением достаточно точного закона передачи движения. Изобретение Уаттом четырехзвенника, одна из шатунных точек которого приближенно воспроизводила прямую линию, явилось удачным выходом из создавшегося положения. Однако вплоть до работ Чебышева количество новых шарнирных механизмов, изобретенных на протяжении первого полустолетия XIX в., едва ли превышало десятков.

Одним из первых объектов исследований П. Л. Чебышева в области теории механизмов и стала теория шарнирных механизмов. «Из многих предметов исследования, которые представились мне при рассматривании и сличении между собою различных механизмов передачи движения, особенно в паровой машине, где и экономия в топливе и прочность машины много зависят от спосо-

бов передачи работы пара, я особенно занялся теорией механизмов, известных под названием параллелограммов. Изыскивая различные средства извлекать из пара наибольшее движение в том случае, когда нужно иметь вращательное движение, как это большею частью бывает, Уатт изобрел особенный механизм для превращения прямолинейного движения поршня во вращательное движение коромысла — механизм, известный под названием параллелограмма. Из истории практической механики известно, что на мысль о возможности подобного механизма великий преобразователь паровых машин и был наведен рассмотрением особенного снаряда, где через совокупление различных вращательных движений получались разнообразные кривые линии, некоторые близкие к прямой. Но мы не знаем, каким путем он дошел до наилучшей формы своего механизма и размера его элементов. Правила, которым следовал Уатт, при устройстве параллелограммов, могли служить руководством для практики только до тех пор, пока не встретилась необходимость изменить форму его; с изменением формы этого механизма потребовались новые правила. Эти правила и современная теория извлекают из начала, которому, по-видимому, следовал Уатт при устройстве своих параллелограммов. Суждения, которые приводят в доказательство этого начала, очевидно, не могут выдержать никакой критики; даже на практике очень часто оказывается неудобным употреблять элементы параллелограмма, находящиеся по этому началу, так что для поправки их понадобились особые таблицы. Из сказанного мною видно, до какой степени необходимо было параллелограмму Уатта и его видоизменения подвергнуть строгому анализу, заменив вышеупомянутое начало существенными свойствами этого механизма и условиями, которые встречаются на практике»³⁶.

Вопросами теории параллелограммов Чебышев занимался еще до своей первой заграничной командировки³⁷. По возвращении из-за границы он представил в Академию наук работу «Теория механизмов, известных под

³⁶ П. Л. Чебышев. Отчет экстраординарного профессора С.-Петербургского университета Чебышева о путешествии за границу. — В кн.: П. Л. Чебышев. Полное собрание сочинений, т. V, с. 249.

³⁷ Там же, с. 245.

названием параллелограммов»³⁸, в которой изложил основы метода приближенного синтеза механизмов. В сущности эта работа является также первым трудом, в котором была поставлена задача аналитического синтеза механизмов. И, кроме того, это была первая работа, в которой задачи теории механизмов были поставлены на языке математики. Правда, и до того времени были математические работы — исследования в области кинематической геометрии и примыкающие к ним работы в области теории зубчатых зацеплений. Но лишь в труде Чебышева впервые практическая кинематика вошла в семейство дисциплин математического естествознания.

Для решения задач синтеза шарнирных механизмов Чебышев разработал специальную математическую теорию — теорию наилучшего приближения функций полиномами.

Принцип параллелограмма Уатта заключается в том, что участок шатунной кривой шарнирного четырехзвенника, имеющий незначительное отклонение от прямой линии, используется для построения механизма, преобразующего вращательное движение в поступательное. Естественно, что преобразование получается приближенным. Параллелограмм Уатта известен в двух вариантах: полном и сокращенном. Сокращенный параллелограмм представляет собой шарнирный четырехзвенник, причем шатунную кривую с приближенно прямолинейным участком описывает или средняя точка шатуна, или иная точка, находящаяся от нее на некотором расстоянии. Полный параллелограмм отличается от сокращенного четырехзвенным пантографом, построенным на шатуне, причем одна из сторон его является продолжением коромысла. Нахождение точки, описывающей приближенно прямую линию, и составляет ту эмпирически решаемую задачу, о которой говорит Чебышев.

Чебышев сформулировал задачу не конкретно, а в более общей форме, из которой решение для искомого параллелограмма вытекало как частный случай: *«Определить изменения, которые надо произвести в приближенном выражении функции $f(x)$, данном ее разложением по степеням $x-a$, если требуется сделать наименьшим*

³⁸ Впервые опубликовано в Петербурге в 1853 г. на французском языке.

предел его погрешности между $x=a-h$ и $x=a+h$, где h — величина не очень значительная»³⁹. Эта идея Чебышева оказалась весьма плодотворной как для теории механизмов, так и для математики.

Чебышеву принадлежит также основополагающая работа в области структурного анализа механизмов — «() параллелограммах» (впервые опубликована в «Трудах» Второго съезда русских естествоиспытателей, проходившего в Москве 1—11 сентября 1869 г.)⁴⁰. Он указал в ней, что шарнирные механизмы («механизмы параллелограммов») можно рассматривать как системы прямых линий, связанных шарнирами, что длины отрезков прямых в этом случае являются неизменными и что шарниры, соединяющие два отрезка, накладывают на них по два условия связи. Таким образом, впервые кинематическая пара получила свое математическое выражение. Обозначив далее m — число звеньев, образующих механизм, n — число шарниров, связывающих по два звена, v — число шарниров, связывающих одно звено с закрепленным звеном (с неподвижной плоскостью), он получил условие принужденного движения механизма

$$3m - 2(n+v) = 1.$$

Эта знаменитая формула⁴¹, названная в несколько именном виде формулой Чебышева, была впоследствии выведена Грюблером⁴² и именовалась в немецкой литературе, а некоторое время и в русской формулой Грюблера, на что не было никакого основания, поскольку работа «() параллелограммах», равно как и предшествующие ей мемуары Чебышева были известны широкому кругу ученых. В 1876 г. Двельсхаверс-Дери⁴³ издал «Про-

³⁹ И. Л. Чебышев. Теория механизмов, известных под названием параллелограммов. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1949, с. 8.

⁴⁰ И. Л. Чебышев. Полное собрание сочинений, т. IV. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1948, с. 16—36.

⁴¹ Там же, с. 17.

⁴² M. Grübler. Allgemeine Eigenschaften der zwangläufigen ebenen kinematischen Ketten.— «Civilingenieur», 1883, Bd. XXX, S. 167—200.

⁴³ Виктор Двельсхаверс-Дери (Victor Dwelshavers-Dery, 1836—1913) — профессор прикладной механики, ректор (1900) Льежского университета. Работы в области термодинамики, исторический очерк технического прогресса Бельгии (1830—1905).

грамму курса прикладной механики». Один из разделов программы был посвящен методу Чебышева (в частности, приводится вывод его формулы). Лабулэ в третьем издании «Курса кинематики» перепечатал этот раздел программы⁴⁴. Еще раньше работа Чебышева была опубликована на немецком языке, на что, впрочем, указывает и сам Грюблер⁴⁵.

Независимо от Робертса Чебышев доказал теорему о шарнирных четырехзвенниках, воспроизводящих одну и ту же шатунную кривую. Эта теорема была лишь частным результатом целой серии работ Чебышева о шарнирных механизмах, которые он впервые в истории науки подверг глубокому исследованию. «Изучая траектории, описываемые отдельными точками звеньев шарнирно-рычажных механизмов, П. Л. Чебышев останавливается на траекториях, форма которых является симметричной. Изучая свойства этих симметричных траекторий (шатунных кривых), он показывает, что эти траектории могут быть использованы для воспроизведения многих важных для техники форм движения. В частности, он показывает, что можно шарнирными механизмами воспроизвести вращательное движение с различным направлением вращения около двух осей, причем указанные механизмы не будут ни параллелограммами, ни антипараллелограммами, обладающими некоторыми замечательными свойствами. Один из таких механизмов, получивший в дальнейшем название «парадоксального», является до сих пор предметом удивления всех техников и специалистов. Передаточное отношение между ведущим и ведомым валами в этом механизме может меняться в зависимости от направления вращения ведущего вала»⁴⁶.

Чебышев не только теоретически исследовал шарнирные механизмы, но и сконструировал целую их серию (свыше 40 механизмов и около 80 их модификаций). Это механизмы с остановками, в которых ведомое звено совершает прерывистое движение, симметричные прямоли-

нейно-направляющие механизмы («стопоходящая машина», гребной механизм), многозвенные прямолинейно-направляющие механизмы и др.⁴⁷ Интересно, что свой метод синтеза механизмов Чебышев применил также к решению задачи о центробежном регуляторе и построении профилей зубчатых колес. В мемуаре «Счетная машина с непрерывным движением», опубликованном во Франции, он описал сконструированную им счетную машину. Эта машина была создана лишь для двух действий: сложения и вычитания. Позже Чебышев усовершенствовал ее, приспособив для умножения и деления, однако система получилась сложной. Несмотря на это, арифмометр Чебышева был для своего времени самым совершенным: в нем при помощи эпициклических механизмов достигалась непрерывная подача цифр.

Единственный экземпляр своего арифмометра П. Л. Чебышев подарил Национальной консерватории искусств и ремесел в Париже⁴⁸. Как отметил в своей статье⁴⁹ председатель Московского отделения русского технического общества В. Г. Бооль (1835—1899), характерными особенностями машины Чебышева являлись: оригинальное устройство, совершенно отличавшее ее от арифмометра Лейбница, схема которого была положена в основу конструкции почти всех арифмометров того времени, очень совершенное устройство для переноса десятков, работавшее безотказно, тогда как в других арифмометрах из-за поломки пружин легко мог возникнуть отказ, — конструкция, приспособленная для выполнения различных действий при помощи одних и тех же приемов.

И в Академии наук, и в университете П. Л. Чебышев был очень близок с В. Я. Буняковским⁵⁰ и О. И. Сомо-

⁴⁷ И. И. Артоболевский, Н. И. Левитский. Научное наследие П. Л. Чебышева, т. II. Теория механизмов. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1945, с. 7—109.— В 1974 г. некоторые новые механизмы Чебышева обнаружены С. М. Великой.

⁴⁸ Второй экземпляр, без множительного устройства, хранится в Ленинградском университете.

⁴⁹ В. Г. Бооль. Арифмометр П. Л. Чебышева.— «Труды отделения физических наук Общества любителей естествознания», 1894, т. 7, вып. 1, с. 12—22.

⁵⁰ Виктор Яковлевич Буняковский (1804—1889) — выдающийся математик. Написал работы в области анализа, теории вероятностей, истории математики, сконструировал счетные приборы.

⁴⁴ Ch. Laboulaye. Traité de cinématique ou théorie des mécanismes, 3-e ed. Paris, 1878, p. 954—961. Note neuvième.

⁴⁵ M. Grübler. Allgemeine Eigenschaften zwangläufigen ebenen kinematischen Ketten.— «Civilingenieur», 1883, Bd. XXX, S. 171.

⁴⁶ И. И. Артоболевский, Б. В. Гнеденко, П. Л. Чебышев.— В кн.: Люди русской науки. М., Физматгиз, 1961, с. 133—135.

вым⁵¹. Благодаря трудам этих трех ученых в 60-х годах XIX в. была создана Петербургская математическая школа. Можно сказать, что к этому времени относится и создание русской школы в области теории механизмов и машин. Если мемуары Эйлера о теории машин были лишь гениальным предвидением, то в начале XIX в. А. А. Бетанкур, Д. С. Чижев, М. В. Остроградский, П. П. Мельников и их ученики заложили основы изучения механики машин в России. Однако лишь ученики Н. Д. Брашмана — выпускники Московского университета — смогли внести в эту науку существенный вклад. А. С. Ершов, его сверстники и ученики много работали над усовершенствованием и развитием русской технической школы и отвели механике машин почетное место в системе высшего технического образования. П. Л. Чебышев заложил основы исследования структуры механизмов, разработал метрический синтез механизмов и глубоко теоретически и практически изучил шарнирные механизмы. В сущности лишь от него начинается планомерное изучение этой важнейшей группы механизмов, и он первый указал на то, что теория механизмов — это наука математическая. Ученики Чебышева продолжили и закрепили исследование и развитие его идей в области механики машин, поэтому с его именем обычно и связывается становление русской специальной научной школы в этом направлении.

⁵¹ Осип Иванович Сомов (1815—1876) — математик и механик, профессор Петербургского университета (1857), академик (1862).

РАЗВИТИЕ КИНЕМАТИКИ МЕХАНИЗМОВ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XIX в.

В 1851 г. в Лондоне состоялась первая Всемирная выставка, на которой, в частности, демонстрировались машины, построенные в разных странах мира, и таким образом появилась возможность оценить прогресс мирового машиностроения. К этому времени промышленный переворот уже завершился в США и странах Западной Европы и приближался к своему завершению в России. С каждым годом появляется все больше новых машин и самых различных областях производства и быстро увеличивается количество механизмов. Техника ставит перед наукой все новые и новые задачи, на которые та не всегда может ответить. Поэтому наряду с развитием фундаментальных и прикладных наук в XIX в. возникают науки технические, предназначенные для обслуживания отдельных направлений техники и базой для которых являются наблюдение и опыт. На основании различного рода соображений, главным образом эмпирических и зачастую несовместимых между собой, строятся формулы с большим количеством эмпирических же коэффициентов. Число таких наук непрерывно увеличивается.

Значительную ломку в своем развитии претерпевают и ветви механики. На протяжении своей многовековой истории механика неоднократно попадала в трудное положение: иногда теоретические рассуждения отрывались от практики (или от практической проверки полученных результатов) и оказывалось, что весьма безупречная математическая теория не может обеспечить полного совпадения теоретических выводов с наблюдением и опытом. Здесь сказывалось естественное происхождение механики.

Но для целей техники требовались решения если и не безошибочные, то во всяком случае приводящие лишь

й небольшим отклонениям от факта. Поэтому уже в середине XIX в. появляются исследования на стыке отдельных ветвей механики, в которых применялись различные инженерные методы и наряду с теоретическими работами проводилась экспериментальная проверка. Интересно, что даже Чебышев при разработке теории приближения функций полиномами провел основательную экспериментальную работу с большим числом механизмов, которые он сам сконструировал и построил.

Как мы видели, два крупных математика и механика занимались разработкой изобразительных геометрических методов: Монж создал начертательную геометрию и ее технический выход — проекционное черчение, а Понселе заложил основы проективной геометрии. На базе этих двух ветвей геометрии в середине XIX в. начинается развитие нового направления инженерных методов расчета — графических методов. Правда, некоторые попытки приемов такого рода производились и ранее: в 1687 г. Ньютон и Вариньон установили основной закон статики — закон параллелограмма сил, который и явился основанием для графических построений. Позже Вариньон разработал метод веревочного многоугольника, ставший основанием для развития графических методов механики.

В 1859 г. М. Ренкин предложил рассматривать ферму как веревочный многоугольник и строить по нему многоугольник сил. Для этого он строил график, отрезки которого были параллельны стержням фермы и равнялись (в определенном масштабе) усилиям в них. Используя эту идею, знаменитый английский физик Джеймс Кларк Максвелл (1831—1879) разработал учение о взаимных фигурах и показал, что построения графической статики дают взаимные фигуры. Тем самым графические методы механики получили строгое обоснование. Работа Максвелла была опубликована в 1864 г. Через два года вышла работа цюрихского профессора Карла Кульмана (1821—1884) «Графическая статика», в которой эта новая наука получила свое наименование. Кульман не только собрал воедино все известные методы графического решения задач статики, но и применил их к решению ряда задач строительной механики. Дальнейшим развитием графической статики обязана трудам профессора Миланского политехнического института Луиджи Кремоны (1830—1903). Метод графического расчета ферм, предложенный

им на основе идей Максвелла, носит название диаграммы Кремоны — Максвелла.

Почти одновременно со статикой графические методы расчетов проникают и в механику машин. Таким образом, уже в самом начале второй половины века наука о машинах, бывшая до того времени в основном наукой описательной, начинает пользоваться аналитическими, графическими и экспериментальными методами исследования. Начинается дифференциация науки: из нее выделяются описательное машиноведение, теория паровой машины, различные ответвления науки о машинах разного рода производств, о транспортных машинах; к концу столетия выделяется и оформляется в отдельную науку учение о деталях машин. Вместе с тем начинается расщепление и науки о машинах в более узком значении — собственно теории механизмов и машин. Вслед за теорией механизмов — кинематикой механизмов, которая иногда (например, у Рело) называется теоретической кинематикой, возникает теоретическая кинематика как раздел аналитической, или рациональной, механики. На базе исследований Шаля и других геометров в работах Мантейгейма и Ароногольда происходит оформление кинематической геометрии как науки на стыке геометрии и кинематики. Самостоятельное значение получает теория шарнирных механизмов, в частности теория механизмов для воспроизведения различных математических зависимостей. Начинается разработка учения о структуре механизмов. Развивается теория зубчатых зацеплений. В динамике машин к концу века самостоятельное значение получают теория трения и теория автоматического регулирования.

Однако развитие отдельных направлений в науке о машинах происходит неравномерно. В XIX в., вплоть до последней его четверти, кинематика механизмов и ее ответвления в своем развитии превалируют над развитием динамики машин: здесь существенное развитие получает только теория маховика и лишь в последней четверти века в связи с потребностями машиностроения, в частности транспортного, важное значение приобретают также отдельные направления динамики машин.

Меняется и география науки. Лидировать продолжают Франция, Англия, Германия и Россия, но важные исследования выполняются также и в Италии, Бельгии,

Австро-Венгрии; к концу века появляются работы, выполненные в США. Наука о машинах следует за развитием машин и одним из существеннейших факторов ее развития становится возникновение новых технических школ машиностроительного профиля: кафедры технических школ и отчасти кафедры университетов являются единственными научными учреждениями того времени, где наука развивается профессионально. Поэтому часто новые результаты впервые появляются в учебнике и теряется грань между учебником и монографией. Важное значение приобретают терминологические споры, в частности спор о том, что представляет собой машина.

В «Технологическом словаре» Драрье, изданном в Брюсселе в 1837 г., дано следующее довольно длинное определение машины:

«Машины. Комбинации из твердых или гибких звеньев, которыми пользуются для того, чтобы передать действие какого-либо двигателя, изменить его по величине и преобразовать в работу, которая и даст определенный результат. Термины инструмент, орудие, приспособление употребляются для обозначения очень простых приборов, применение которых аналогично применению машин. Но в последних всегда предполагается большая сложность состава и от них не отделима идея движения.

Замечено, однако, что во всех механических структурах есть такие простые элементы, которые в своем соединении и образуют машину. Этим элементам присвоено имя простых машин; они являются существенными элементами, из которых построены все механические приборы, и их насчитывается семь: гибкие элементы, рычаг, блок, ворот, наклонная плоскость, винт и клин»¹.

Таким образом, «простые машины», оказывается, ведут себя, как мухи из басни: гонимые в дверь, они возвращаются через окно. И так было не только в XIX в., но и в XX в.! Профессор МВТУ А. И. Сидоров приводит такой пример: молодой преподаватель, поступив в 1910 г. в Московское педагогическое учебное заведение, подал реферат, в котором подверг критике теорию «простых машин». Большинство преподавателей настолько враждебно отнеслись к досадному «новшеству», что автору

¹ *Drapier. Abrégé du grand dictionnaire technologique. Bruxelles, 1837, p. 136.*

реферата пришлось оставить это учебное заведение². А в середине XIX в. еще многие ученые считали, что так как при статическом расчете машины можно пользоваться правилами статики простых машин и законами трения, полученными в результате экспериментов, проведенных на наклонной плоскости, то, следовательно, все машины в действительности состоят из рычагов, наклонной плоскости и других простых машин. Поэтому вопрос о машине и о ее сущности был не так-то прост и имел немаловажное значение для дальнейшего развития науки.

Вклад огромной важности в изучение машины и выяснение ее роли в развитии общества внесли основоположники научного коммунизма К. Маркс и Ф. Энгельс. «Всякое развитое машинное устройство состоит из трех существенно различных частей: машины-двигателя, передаточного механизма, наконец машины-орудия, или рабочей машины. Машина-двигатель действует как движущая сила всего механизма. Она или сама порождает свою двигательную силу, как паровая машина, kalorическая машина, электромагнитная машина и т. д., или же получает импульс извне, от какой-либо готовой силы природы, как водяное колесо от падающей воды, крыло ветряка от ветра и т. д. Передаточный механизм, состоящий из маховых колес, подвижных валов, шестерен, эксцентриков, стержней, передаточных лент, ремней, промежуточных приспособлений и принадлежностей самого различного рода, регулирует движение, изменяет, если это необходимо, его форму, например превращает из перпендикулярного в круговое, распределяет его и переносит на рабочие машины. Обе эти части механизма существуют только затем, чтобы сообщить движение машине-орудию, благодаря чему она захватывает предмет труда и целесообразно изменяет его»³, — такое общее определение машины дает Маркс.

Это определение явилось логическим продолжением идей о развитии машины, которые Маркс высказал еще в 1847 г.: «Простые орудия, накопление орудий, сложные орудия; приведение в действие сложного орудия одним двигателем — руками человека, приведение этих инстру-

² А. И. Сидоров. Основные принципы проектирования и конструирования машин. М., Макиз, 1929, с. 137.

³ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 23, с. 384.

ментов в действие силами природы; машина; система машин, имеющая один двигатель; система машин, имеющая автоматически действующий двигатель, — вот ход развития машин»⁴. Здесь Маркс показывает преимущественную роль орудия, рабочей части в развитии машины, а также отмечает тенденцию превращения машин в систему машин; система машин опять-таки определяется своими исполнительными органами. Характерно, что Маркс применяет для определения понятия машинного устройства слово «Maschinerie»⁵, соответствующее как машине, так и системе машин.

Идею развития машин к автоматической системе подчеркивает и Энгельс в «Конспекте I тома „Капитала“»:

«В крупной промышленности применяются двоякого рода машины: или 1) кооперация однородных машин (механический ткацкий станок, машины для изготовления конвертов, которые исполняют работу целого ряда частичных рабочих путем комбинирования различных орудий) — здесь уже имеется технологическое единство благодаря передаточному механизму и двигателю, или 2) система машин, комбинация различных частичных рабочих машин (прядение). Последняя находит свою естественную основу в мануфактурном разделении труда. Но здесь имеется существенное различие. В мануфактуре каждый частичный процесс необходимо было приспособлять к рабочему; здесь же в этом уже нет надобности: процесс труда объективно может быть разделен на свои составные части, и проблема выполнения каждого частичного процесса при помощи машин решается наукой или основанным на ней практическим опытом. Здесь количественное отношение отдельных групп рабочих повторяется в виде отношения отдельных групп машин...»

В обоих случаях фабрика образует *большой автомат* (который, впрочем, только в последнее время усовершенствовался в этом направлении), и это — ее адекватная форма... Самой совершенной его формой является *автомат, производящий машины*, автомат, который уничтожил ремесленную и мануфактурную основу крупной промышленности и тем самым впервые придал законченную форму машинному производству...»⁶

⁴ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 4, с. 156.

⁵ К. Маркс. Das Kapital, Bd. I. Dietz Verlag, Berlin, 1957, S. 389—390.

⁶ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 16, с. 289—290.

Идеи Маркса о развитии машин явились результатом очень большой работы над первоисточниками. Он изучил, в частности, книгу Беббиджа⁷, которую неоднократно цитирует, слушал лекции крупнейшего авторитета в области технической кинематики Виллиса. В письме Энгельсу от 28 января 1863 г. он писал по этому поводу: «Я вношу некоторые добавления в раздел о машинах. Там есть ряд любопытных вопросов, которые я обошел при первой обработке. Для того чтобы уяснить себе все это, я перечитал целиком свои тетради (выписки) по технологии и слушаю практический (чисто экспериментальный) курс для рабочих профессора Уиллиса (на Джерминстрит в Геологическом институте, где читал свои лекции также и Гаксли)»⁸.

Но не только в исследовании понятия машины ценность 13-й главы «Капитала»: 12-я и 13-я главы представляют собой критическую историю промышленного переворота, глубокое и очень интересное историко-техническое исследование. Основная мысль этого исследования — роль рабочей машины в промышленном перевороте — неоднократно подчеркивается Марксом и в других сочинениях. Интересно, что машину как таковую Маркс не считал экономической категорией: «Машина, — писал он, — так же мало является экономической категорией, как бык, который тащит плуг. Современное применение машины есть одно из отношений нашего современного экономического строя, но способ эксплуатации машин — это совсем не то, что сами машины. Порох остается порохом, употребляется ли он для того, чтобы нанести рану человеку или для того, чтобы залечить раны того же самого человека»⁹.

Одновременно с поисками, направленными на выяснение понятия машины, продолжались поиски наиболее приемлемой для потребностей машинной техники классификации механизмов: этим вопросом занимаются все без исключения авторы учебных книг по кинематике, исходя из главного образом из системы Виллиса, самой распространенной в XIX в., но модифицируют ее с учетом идей Монжа и Борньи.

⁷ Ch. Babbage. On the Economy of Machinery and Manufactures. London, 1832.

⁸ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 30, с. 261.

⁹ К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 27, с. 405.

Одним из самых распространенных учебников кинематики был курс, написанный Лабулэ¹⁰. Он выдержал три издания и сыграл во второй половине века очень важную роль. Этот «Курс кинематики или теории механизмов»¹¹ был задуман автором как практическое руководство, призванное облегчить студенту и начинающему технику первое знакомство с производственными машинами, учитывая, что студент, прослушавший полный курс прикладной механики, оказывается беспомощным на заводе.

Курс Лабулэ предусматривает изучение механизмов, их назначения, направлений движения и скоростей применительно к разным условиям работы, способов регулирования, модифицирования и преобразования движений. Все механизмы изучаются в трех системах: рычага, ворота и наклонной плоскости.

В качестве основного принципа классификации механизмов Лабулэ принимает принцип преобразования движений Монжа, причем настаивает на его априорности. Так как основным законом, определяющим все многообразие машин, является передача и преобразование движений, то, следовательно, он и должен быть исходным при любой систематизации механизмов. Но одновременно Лабулэ ищет точки соприкосновения принципа Монжа с теорией простых машин. Подобная мысль не была новой, она возникала и у других последователей Виллиса, однако Лабулэ проводит ее последовательнее других. Разложив механизмы по клеточкам в соответствии с принципом преобразования движений, он ищет в них общие свойства, которые бы соответствовали также его «силовой» систематике. «Любой элемент машины может принадлежать в заданный момент времени к одной из трех систем — рычага, ворота или наклонной плоскости — или

же к некоторой комбинации этих систем. А следовательно, надо изучить постоянно встречающиеся системы, обычно называемые простыми машинами. К системе рычага относятся простые машины с одной закрепленной точкой, к системе ворота — с двумя закрепленными точками, к системе наклонной плоскости — с тремя точками, находящимися на неизменных расстояниях друг от друга». Исходя из этого предположения Лабулэ заключает, что и элементарные движения, воспроизводимые механическими системами, могут быть лишь прямолинейными и круговыми: он опять возвращается к идеям Монжа. Несколько далее он указывает, что «вопрос преобразования движений приводит к образованию кинематических пар, приспособленных для воздействия одного органа на другой».

Анализируя машину, Лабулэ, не без влияния идей Борнш, находит в ней приемники, передачи, модификаторы и операторы. Он утверждает, что при изучении передачи движения в каждом конкретном случае следует обратить внимание на относительные положения направлений обоих движений и их относительные скорости — на постоянное или переменное значение отношений скоростей. Так как равномерность движения является необходимым условием экономичности работы, то отношения скоростей органов, промежуточных между приемником и оператором, чаще всего бывают постоянными, к чему и следует стремиться. Если же это невозможно, то преобразование движения возлагается на последнюю передачу так, чтобы она передала специальный вид движения, который требуется природой рабочего процесса, выполняемого оператором.

Итак, Лабулэ начинает анализ механизма с понятия кинематической пары. Мы видели, как оно постепенно возникало и приобретало все более и более точные формы: Лабулэ в этом отношении уже непосредственный предшественник Рело. Затем Лабулэ переходит к деталям механизма (типы «простых машин»), систематизирует механизмы по Монжу и исследует законы изменения движения в механизмах по Виллису. Он делит механические системы на два рода, с постоянным и переменным отношением скоростей и с передачей движения непосредственным соприкосновением (качением или скольжением) и при помощи промежуточных органов (гибких или твер-

¹⁰ Шарль Лабулэ (Charles Pierre Lefebvre Laboulaye, 1813—1886). Окончил Политехническую, затем Инженерную школу в Метце. С 1836 г. начал работать в промышленности. Много занимался литейным производством. Ему принадлежит ряд изобретений главным образом в литейной технике. В 1862—1869 гг. Лабулэ редактировал журнал «Annales du Conservatoire des arts et metiers». Издал энциклопедический словарь по технике в четырех томах: «Dictionnaire des arts et manufactures», большинство статей в котором написал он сам.

¹¹ Ch. Laboulaye. Traité de cinématique ou théorie des mécanismes. Paris, 1849 (3-e ed., 1878).

дых). Переходя от элементарных к составным движениям, Лабулэ рассматривает системы зубчатых колес, дифференциальные и некоторые специальные механизмы. Книга содержит также некоторые сведения по динамике машин.

Классификация механизмов, предложенная Жиро¹², также носит на себе влияние школы Виллиса. Жиро исходит из предположения, что исследованию подлежат лишь два типа движения: поступательное прямолинейное и вращательное около неподвижной точки. Поэтому движение тела можно представить в виде прямолинейного или кругового движения точки. Естественно, что подобное упрощение не могло привести существенных изменений в теорию, и у Жиро не получилось общности методов исследования; так, кулачковые механизмы оказались во всех трех разделах его сочинения. Вместе с тем работа Жиро явилась шагом вперед по сравнению с другими учебниками: это было серьезное исследование, где автор пользовался математическими (геометрическими) методами, полностью отказавшись от описательных. Работа Жиро была, таким образом, более теоретической, чем практической.

В 1869 г. Жиро опубликовал «Основания геометрической теории эксцентров и зубчатых колес». Это было первым сочинением, в котором кулачковые механизмы были подвергнуты достаточно глубокому исследованию.

Курсы Беланже, Гатона де ла Гуийера и Бура, опубликованные в 60-х годах XIX в., представляют собой в определенном отношении реакцию на работу Жиро: в них опять практика превалирует над теорией.

«Курс кинематики» Беланже¹³ написан в соответствии с новыми программами Политехнической школы,

¹² Шарль Жиро (Charles François Girault, род. в 1818 г.) — профессор Канского университета (Нормандия). Его работы: *Éléments de géométrie appliquée à la transformation des mouvements dans les machines*. Paris, 1858; *Premiers principes de la théorie géométrique des excentriques et des engrenages*. Paris, 1869.

¹³ Жан Батист Беланже (Jean-Batiste Charles Belanger, 1790—1874). Окончил Политехническую школу и Школу мостов и дорог. Работал инженером путей сообщения, затем преподавателем. Длительное время преподавал в Центральной школе искусств и ремесел, затем получил кафедру механики в Школе мостов и дорог. В 1851—1860 гг. читал кинематику в Политехнической школе; кинематика тогда была отделена от прикладной механики и

отредактированными под руководством Понселе. Книга состоит из двух частей. Первая часть — курс кинематики точки, твердого тела и системы твердых тел (механизмов); вторая — описание механизмов.

Беланже начинает с критики системы Ланца—Бетанкура. По его мнению, в этой системе слишком много типов преобразований, которые иногда повторяются, а иногда являются всего лишь частными случаями более общих типов. Поэтому он сводит все преобразования движений к пяти классам. Класс подразделяется на роды в соответствии с направлениями и отношениями скоростей, а род — на виды. Систематика Беланже получает при этом следующий вид.

I класс. Преобразование двух вращений, одновременно непрерывных или возвратных.

Род 1. Отношение скоростей постоянное.

Вид 1. Оси параллельны.

Вид 2. Оси не параллельны.

Вид 3. Оси в разных плоскостях.

Род 2. Отношение скоростей переменное.

Вид 1. Оси параллельны.

Вид 2. Оси не параллельны.

II класс. Преобразование двух движений, одного вращательного, другого прямолинейного или по кривой, с одновременным изменением знака.

Вид 1. Перенос параллельно плоскости вращения.

Вид 2. Перенос параллельно оси вращения.

III класс. Преобразование двух прямолинейных движений.

IV класс. Преобразование двух вращений, непрерывного и возвратного.

Вид 1. Оси параллельны.

Вид 2. Оси не параллельны.

V класс. Преобразование двух движений, непрерывного вращения и прямолинейного возвратно-поступательного.

Вид 1. Перенос параллельно плоскости вращения.

Вид 2. Перенос параллельно оси вращения.

Следовательно, по этой систематике зубчатые и гибкие передачи следует отнести к I классу, где они попадут

иногда эти два предмета читали разные преподаватели. «*Traité de cinématique*» (1864). Ряд работ по математике и механике.

в оба рода и во все пять видов. Например, цилиндрическое зацепление относится к роду 1, вид 1; коническое зацепление — вид 2; червячное зацепление — вид 3; специальные зубчатые передачи — род 2, виды 1 и 2; передача между рейкой и колесом относится ко II классу и т. д. Различные виды зубчатых передач можно таким образом обнаружить во всех классах. В подобном же положении оказываются и другие механизмы.

В отдельную группу Беланже выделяет органы машин, служащие для включения, выключения, а также для изменения связей между отдельными механизмами. Сюда он отнес коробки скоростей, дифференциалы (т. е. опять-таки зубчатые механизмы!), муфты, устройства для включения шкивов, ступенчатые шкивы, вариаторы и пр.

Интересную характеристику работе Беланже дал Ф. Э. Орлов (правда, находившийся в то время под сильным влиянием Рело):

«Одна из лучших французских кинематик последнего времени есть кинематика Беланже. Он различает уже движения не по одному направлению, но и по скорости, с которой движение происходит; поэтому он приходит к новому разделению машин на классы, причем главным образом различает постоянное и переменное отношение скоростей преобразуемых движений. Та же самая мысль и почти в то же время была принята английским кинематиком Виллисом в «Principles of Mechanism». Нет сомнения, что эта новая система была шагом вперед в изложении кинематики, но только относительно внешней стороны изложения. В том виде, в каком создали ее французские писатели, кинематика оставалась описательной наукой, она не имела своей самостоятельной теории; она давала только перечень существующих механизмов в более или менее стройном порядке, но она не имела того существенного характера дедуктивной науки, которым отличаются и геометрия, и механика, который состоит в обобщении отдельных явлений или истин, в приведении их в связь и зависимость между собой, в отыскании закона этой зависимости, знание которого дает возможность выводить новые заключения и следствия. Этим характером жизненности, способностью рождать новые истины, конечно, не обладала старая кинематика, почему нельзя было ее назвать наукой, как нельзя назвать наукой простой перечень фактов, имеющих между собой одну внеш-

нюю зависимость. Правда, во введении в кинематику обыкновенно излагаются основные понятия о движении, независимо от силы, которая производит движение, некоторые геометрические методы исследования движений и особенно известная геометрическая теория движения Пуансо, но эта общая часть кинематики стоит совершенно отдельно и без связи с последующим существенным содержанием кинематики — теорией механизмов. Геометрический метод исследования движений, действительно свойственный науке о движении, отвлекающийся от причин этого движения, употребляется только в теории зацеплений, да иногда в теории шатуна и кривошипа. Беланже дает этой общей части науки большее развитие в своем сочинении, отличающемся несомненными достоинствами, а теории механизмов отводит несколько последних страниц, отсылая читателя к синоптическим таблицам, где эти механизмы занесены в таком порядке, что лучшего нельзя желать даже для генеалогической таблицы. Подобные таблицы только тогда имели бы мысль, если бы они были действительно генеалогическими, т. е. показывали бы внутреннюю связь между механизмами разного рода и их происхождение одного из другого. Но именно этого недостает французской кинематике»¹⁴.

Беланже занимался также общей теорией зацеплений. Он представил сложное движение двух твердых тел в виде перекатывания с переносом двух конусов, связанных с телами, и в несколько более общем виде как движение двух поверхностей со скольжением. В «Опыте теории гиперболоидального зацепления»¹⁵ Беланже исправил ошибку Виллиса, который в первом издании «Принципов механизмов» принял, что в гиперболоидальном зацеплении мгновенная ось относительного движения делит кратчайшее расстояние между осями на отрезки, обратно пропорциональные угловым скоростям.

В 1864 г. был издан также «Курс механизмов» Гатона де ла Гупийера¹⁶. Книга эта представляет интерес

¹⁴ Ф. Е. Орлов. Дневник заграничной командировки. 1869—1872. М., 1898.

¹⁵ Belanger. Résumé d'une théorie de l'engrenage hyperboloïde.—C. R. de l'Acad. de Sciences, t. LII. Paris, 1860.

¹⁶ Гатон де ла Гупийер (Julien Napoleon Haton de la Goupillière, 1833—1927). Окончил Политехническую и Горную школы. Был профессором, затем директором Горной школы. В 1861 г. получил

как первый университетский учебник по прикладной кинематике (в 1861 г. курс теории механизмов был включен в программы университетского преподавания).

Как и все французские механики XIX в., Гатон де ла Гупийер в своем исследовании исходит из трехчленного деления машины на приемник, передачу и орудие, но в отличие от других наиболее важной считает вторую составляющую машины — передачу: «...между этими двумя частями, вид которых зависит от природы двигателя и обрабатываемого вещества, находится третья, предназначенная для их соединения. Она является наиболее механической из всех трех, и составляющие ее элементы остаются почти теми же самыми, если не считать некоторой их перегруппировки. Мы назовем их механизмами; к ним относятся, например, зацепления, эксцентрики, бескопечные ремни, параллелограммы и пр.»¹⁷. Он предлагает следующую схему систематики механизмов:

Передачи	Непосредственное соприкосновение	Чистое качение	I кл. Катки
		Чистое скольжение	II кл. Ползуны
	Посредственное соприкосновение	Смешанные движения	III кл. Кулачки
			IV кл. Зубчатые зацепления
Вспомогательные механизмы	Твердые звенья		V кл. Шарнирные механизмы
		Гибкие звенья	VI кл. Гибкие передачи
			VII кл. Приспособления для включения
			VIII кл. Регуляторы
			IX кл. Индикаторы

Теорию механизмов Гатон де ла Гупийер излагает весьма обстоятельно: механизмы группирует в соответствии со своей систематикой (по методам исследования), расчетные методы стремится упростить и сделать удобными для практического применения. Еще ближе, чем Лабулэ, он подошел к понятию кинематической пары, что отметил, в частности, А. М. Антонов.

в Сорбонне кафедру прикладной механики. Член Парижской академии наук (1898).

¹⁷ J. N. Haton de la Goupilliere. *Traité des mécanismes*. Paris, 1864, p. 24.

Зубчатым зацеплениям Гатон де ла Гупийер посвящает отдельную монографию «Теоретический и практический трактат о зацеплениях», которая является дополнением к курсу механизмов. В предисловии автор не без ехидства отмечает, что он не имел намерения конкурировать с Оливье, труд которого интересен «учеными геометрическими изысканиями, почти бесполезными для приложений». В работах Ашетта, Виллиса и Лабулэ, пишет он далее, вопросы зацепления рассматриваются не специально и притом разбросаны по разным местам.

Первая глава книги посвящена теории плоского цилиндрического зацепления. Задача в общем виде формулируется так: «Два центра вращения O и O' следует связать с двумя кривыми или зубьями, которые постоянно находятся в соприкосновении, причем отношение угловых скоростей сохраняется постоянным». Далее автор дает понятие о начальных окружностях колес и излагает способ построения профилей зубьев по эвольвенте. «Все колеса, зубья которых очерчены по развертке круга, могут зацепляться между собой. Это свойство является важнейшим, так как оно дает возможность, например, одному ведущему колесу приводить в движение одновременно несколько других колес. Более того, если оси немного отклонились из-за игры в механизме, случайной или постоянной, как это бывает в прокатных станах, а также в других машинах, то зацепление не прекратится»¹⁸. Автор не рекомендует, однако, применять эвольвентное зацепление для профилирования зубьев внутреннего зацепления, так как считает, что контакт их в данном случае будет чрезмерным.

Как известно, понятие модуля появилось лишь в начале второй половины XIX в., причем первоначально оно применялось для обозначения числа зубьев колес. Гатон де ла Гупийер пишет по этому поводу: «...колеса снабжают несколькими зубьями и совершенно естественно, что они должны быть идентичными. Число зубьев имеет для колеса исключительную важность, какой бы ни была природа их очертания. Мы назовем это число модулем соответствующего колеса. Модули обязательно полу-

¹⁸ J. N. Haton de la Goupilliere. *Traité théorique et pratique des engrenages*. Paris, 1861, p. 12.

чаются в целых числах и ниже некоторого предела, который не может быть особенно большим».

Во второй главе книги автор рассматривает пространственные зацепления: коническое, для которого излагает теорию зацепления на сфере (здесь же приводит приближенное построение конического зацепления по методу Тредгольда), и зацепление для осей, не пересекающихся в пространстве (теория зацепления Оливье).

В книге дается много практических советов. Интересным нововведением является применение методов начертательной геометрии к построениям механики машин.

«Курс механики и машин» Бур¹⁹, читанный им в Политехнической школе, был издан в 1865 г. Книга состоит из двух частей. Первая посвящена теоретической кинематике, вторая — теории механизмов. По определению Бур, «каждая машина предназначена для выполнения определенных механических операций и предполагает существование двух объектов, не зависящих от нее. Этими объектами являются движущая мощность и выполняемая работа. Машина представляет собой промежуточное звено, которое дает двигателю возможность выполнить заданную работу»²⁰. Бур пользуется классификацией Виллиса с незначительными изменениями.

В своем курсе Бур пользуется уже графическими методами. Научный уровень курса Бур весьма высок. Автор посвящает целый раздел технике эксперимента. Коснувшись вопроса о параллелограмме Уатта, разбирает его принципиальную трудность и указывает, что этот вопрос был решен П. Л. Чебышевым в работах 1854 и 1861 гг. Параллелограммам Чебышева он отводит три страницы своей книги²¹.

В 1878 г. вышло из печати третье издание известного курса кинематики Лабулэ. В предисловии автор пишет: «Прогресс, достигнутый (в области кинематики.— А. Б.) за последнее время, является очень значительным. Тео-

рия мгновенных центров вращения благодаря Пуансо и Шалю создала замечательную основу для анализа движений; работы Чебышева, Филлипса, Поселле продвинули вперед теорию шарнирных механизмов; наконец, исследование многих ученых уяснили движения различных комбинаций органов, не говоря уже о Виллисе, последние работы которого являются настолько же ясными и совершенными, как и превосходные страницы его «Принципов механизмов», с которыми я ознакомил французскую публику в моем первом издании»²². Лабулэ уже отчетливо разделяет механику машин на две составные части: «Есть две совершенно разные части в механике, прилагаемой к машинам. Первая, которая трактует о наилучшем применении движущей силы, о наибольшем полезном действии, об оценке сопротивлений, составляет ту часть, которую мы называем динамикой; она была прекрасно изложена в курсе Понселе, основного творца механики в приложении к машинам. Вторая часть трактует о направлениях и скоростях движений, производимых механизмами; эту часть механики мы называем механикой геометрической, или кинематической»²³. Характерно, что Лабулэ не вспоминает об ускорениях как о кинематическом параметре: многие курсы кинематики механизмов того времени, изданные на разных языках, об ускорениях вообще не упоминают.

Некоторые разделы своей книги Лабулэ коренным образом переработал. В частности, включил несколько критических замечаний (точнее, ответов на критику) в адрес Рело, оставил параграфы с данными для расчетов, задачи, приложения, из которых особенное значение имеет девятое дополнение, содержащее краткое изложение метода Чебышева. Некоторое место Лабулэ отводит новым идеям в механике машин, в частности проблеме синтеза. Упоминает он и о проблеме автоматизации: «...значительное число производств,— пишет он,— пришло к полной автоматизации, т. е. к тому, что сырье преобразуется в промышленные товары без применения человеческого труда, за исключением, конечно, труда весьма высокого порядка, посвященного надзору и включению механизмов в работу. Прядение, механическое ткацкое производство,

¹⁹ Жак Бур (Jacques Edmond Emile Bour, 1832—1866) окончил Политехническую школу, затем Горную школу. С 1855 г.— профессор горного дела и механики в Сент-Этьенне, с 1860 г.— профессор механики Политехнической школы. Ряд работ по математике и механике.

²⁰ E. Bour. Cours de Mécanique et Machines professé à l'Ecole Polytechnique. Paris, 1865, p. 177.

²¹ Там же, с. 298—300.

²² Ch. Laboulaye. Traité de cinématique théorique et pratique, p. I.

²³ Там же, с. VII.

изготовление бумаги являются общеизвестными примерами автоматизированных отраслей индустрии»²⁴.

В середине XIX в. происходит становление кинематики как ветви рациональной механики, изучающей вопросы законов движения точки, твердого тела и системы твердых тел. Одной из первых работ, в которых движение было подвергнуто теоретическому исследованию, явился «Трактат чистой кинематики» Резалья²⁵.

Исследованиями в области кинематики Резаль занимался с 1850 г. Им было найдено несколько теорем, относящихся к этой ветви теоретической механики, в частности о качении и скольжении твердых тел, об относительном движении точки и твердого тела. Он развил начатую Трансоном теорию ускорений второго порядка (перемещений третьего порядка, или сверхускорений, по терминологии Резалья). Трансон рассмотрел вопрос об ускорениях второго порядка в движении точки, но скорее с философской точки зрения²⁶. Резаль развил поставленную таким образом задачу²⁷, а затем распространил полученные результаты на ускорения высших порядков. Исследование Резалья является в основном геометрическим. С именем Резалья также связана кинематическая интерпретация закона изменения кинетического момента: скорость полюса для каждого момента равна по величине и совпадает по направлению с полным моментом внешних сил. Впрочем, эта теорема несколько ранее Резалья была сформулирована английским механиком Гейвордом.

Исследования геометрии движения, развитие Шалем, а по теории зубчатых зацеплений — Оливье, непрерывно развивались на протяжении всего столетия. Существенный вклад в это направление внес Бресс²⁸. Им были вы-

сказаны важные соображения относительно мгновенного центра второго порядка и даны определения радиусов кривизны плоских кривых. Его именем обладают только соответствующие тем точкам, которые обладают только тангенциальным ускорением («поворотные круги»), и тем, которые обладают только нормальным ускорением («круги перемены»). В области теории мгновенного центра ускорений работали также Трансон и Маннгейм; общая геометрическая теория была разработана Николаидесом.

Трансон определил радиусы кривизны линий, описываемых при движении плоской фигуры для случая, когда центроиды не даны. В 1845 г. он нашел формулу радиуса кривизны и показал ее применение к определению центров кривизны.

При движении плоской фигуры можно найти бесконечное множество точек, которые в данное мгновение описывают прямолинейные элементы или проходят через точку изгиба на своих траекториях. Геометрическим местом этих точек является окружность, диаметром которой служит отрезок, соединяющий мгновенные центры первого и второго порядков. Направления прямолинейных элементов проходят через мгновенный центр второго порядка, что было замечено Маннгеймом в 1858 г.

Общая теория мгновенных центров кривизны была изучена Николаидесом в работах 1863—1871 гг. Он дал геометрическое построение мгновенного центра первого порядка для общего случая, когда некоторая кривая перескакивает другую заданную кривую под постоянным углом.

Все эти результаты относились к кинематической геометрии, которая в начале 60-х годов вслед за теоретической кинематикой выделилась в самостоятельную ветвь механики. Предметом ее стало изучение свойств изменяющихся фигур, движущихся в плоскости, а затем и в пространстве. Само наименование «кинематическая геометрия» впервые было предложено основателем «Nouvelles Annales de Mathématiques» Теркемом²⁹ в 1859 г. Не-

ботал ассистентом Беланже в Школе мостов и дорог, затем стал его преемником по кафедре (1853). Получил от Парижской академии наук премию Понселе (1874). Член Парижской академии наук (1880).

²⁹ Олри Теркем (Aulrea Terquem, 1782—1862). По окончании Политехнической школы работал в ней репетитором. Внес большой вклад в историю математики. Адъюнкт-профессор (1814).

²⁴ Ch. Laboulaye. Traité de cinématique theorique et pratique, p. 935.

²⁵ Анри Резаль (Henri Ame Resal, 1828—1896) — горный инженер, профессор Политехнической школы (1870), позже профессор Горной школы. Член Парижской академии наук (1873), редактор математического журнала «Journal de Mathématique». Написал также «Курс общей механики» (Traité de mécanique générale, 6 vls. Paris, 1873—1881).

²⁶ Transon. — «Journal de Mathématique pure et appliquée», 1845, t. X.
²⁷ H. Resal. Traité de cinématique pure. Paris, 1862, chap. 6: De la Suraccélération, p. 269—327.

²⁸ Жак Антуан Шарль Бресс (Jacques Antoine Charles Bresse, 1822—1883). Окончил Политехническую школу (1843) и Школу мостов и дорог. Начиная с 1848 г. преподавал прикладную механику. Ра-

смотря на то что количество информации в области этой науки постоянно увеличивалось, название ее не получило прав гражданства вплоть до 1872 г., пока Аронгольд³⁰ не опубликовал свои «Основания кинематической геометрии» — лекции, читанные им в Берлинской ремесленной академии.

В течение второй половины века многие ученые, геометры и механики работали в области, находящейся на стыке геометрии и кинематики. Кроме Шаля, который занимался исследованиями в этой области на протяжении едва ли не всей своей жизни, существенный вклад в кинематическую геометрию внесли Джулио, Беллавитис³¹, В. Н. Лигин, И. И. Сомов, Кэйли, Гатон де ла Гупийер, а также ряд других ученых. Особенно много сделал в области кинематической геометрии Маннгейм³², который, можно сказать, привел ее в порядок и оформил как научное направление.

Зимой 1878/79 г. Маннгейм прочел в Политехнической школе курс лекций по начертательной геометрии, в котором уделил значительное внимание вопросам кинематической геометрии. Этот курс был издан в 1882 г. и переиздан в 1886 г.³³, вторая его часть в сущности является попыткой впервые изложить элементы кинематической геометрии. Однако, как указывает Маннгейм, сообщение ряда сведений из этой области было сделано еще раньше: «В 1867 г. совет усовершенствования Политехнической школы, в ответ на предложение... генерала Фове, который командовал тогда школой, постановил разрешить профессорам модифицировать свои курсы. Пользуясь этим, с это-

³⁰ Зигфрид Аронгольд (Sigfried Aronhold, 1819—1884) — преподаватель математики в Инженерной и Артиллерийской школах в Берлине, затем профессор Ремесленной академии (позже Высшего технического училища). *Grundzüge der kinematischen Geometrie*. — «Verhandlungen zu Beförderung des Gewerbeflusses». Berlin, 1872, Bd. 51.

³¹ Джинсто Беллавитис (Ginsto Bellavitis, 1803—1880) — профессор математики университета в Падуе. Работы в области аналитической геометрии, гиперкомплексных чисел.

³² Виктор Майер Амеде Маннгейм (Victor Mayer Amédée Mannheim, 1831—1906). Окончил Политехническую школу (1848), репетитор (1859), профессор Политехнической школы (1864). Полковник артиллерийской службы.

³³ A. Mannheim. *Cours de géométrie descriptive de l'Ecole Polytechnique*, comprenant les éléments de la géométrie cinématique. Paris, 1886.

го времени я начал излагать различные свойства, относящиеся к перемещению фигур; постепенно и добавлял к ним и другие»³⁴. Существенной особенностью кинематической геометрии, выделяющей ее из кинематики, явилось то, что кинематика в своих исследованиях исключает силу, и кинематическая геометрия — и силу, и время.

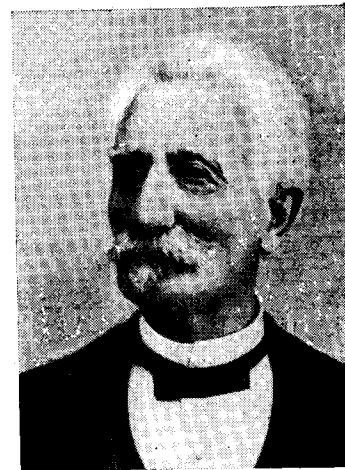
В 1894 г. Маннгейм издал курс кинематической геометрии, в котором свел как свои собственные исследования, так и работы других ученых³⁵.

В последней четверти века вопросами кинематической геометрии занимались уже многие ученые: Келини, Форменти (Италия), Даландер (Швеция), Э. Ламарль (Бельгия), Петерсен (Дания) и ряд других. Профессор математики и механики, член-корреспондент Бельгийской академии наук Филипп Жильбер (Philippe Gilbert, 1832—1892) еще в 1858—1861 гг. опубликовал исследования относительно построения центров кривизны траекторий точек подвижной плоскости. Здесь он исходил из построения Бобилье. Он указал на роль, которую играют окружность изгибов (поворотная окружность) и окружность центров (окружность возврата) в общей теории. Кинематикой непрерывных фигур на искривленных поверхностях занимался Морис Леви.

В тот же период становления кинематической геометрии внимание ученых привлекают еще два направления кинематики, также связанные с геометрией и также в конечном счете учитывающие исключение силы и времени. Это, во-первых, теория механизмов, предназначенных для воспроизведения определенных математических зави-

³⁴ Там же, с. VIII.

³⁵ A. Mannheim. *Principes et développements de géométrie cinématique*, ouvrage contenant de nombreuses applications à la théorie des surfaces. Paris, 1894.



A. Маннгейм

симостей, и, во-вторых, методы графического решения задач механики (и теории механизмов). Постепенно графические методы становятся одним из аппаратов решения задач кинематической геометрии (или близких к ним). К графическим методам привело также развитие технических наук, которые, по крайней мере на первом этапе своего развития, не были особенно заинтересованы в точности решения: требовались в основном наглядность, относительная безошибочность и быстрота.

В деле становления технических наук важную роль сыграло развитие машинной промышленности в Англии и США. Американское машиностроение начало выходить на мировую арену со второй половины XIX в. и быстро захватило ведущие позиции в некоторых весьма важных направлениях техники, что, естественно, не могло не повлиять и на развитие науки.

Новая история Америки начинается с 1783 г., когда североамериканские колонии Великобритании добились независимости от метрополии, политической и хозяйственной. Дата эта совпадает с началом промышленного переворота в США. Экономическое развитие объединившихся штатов было неравномерным: восточные штаты, примыкавшие к Атлантическому океану и более тесно связанные с Европой, характеризовались более сильной промышленностью, западные и южные штаты стали районами развивающегося сельского хозяйства. Дальнейшее промышленное развитие США было связано, с одной стороны, с экспансией на Запад и Юго-Запад, с захватом новых земель, с аннексией северных территорий Мексики, а с другой — с безудержным развитием капиталистических отношений в промышленности и сельском хозяйстве. И хотя паровая машина была освоена американской промышленностью относительно поздно, промышленный переворот, начавшийся в хлопчатобумажной промышленности, быстро распространился на другие отрасли хозяйства. В 1820 г. только четверть промышленной продукции была произведена на фабриках, а три четверти — руками ремесленников, а уже через 40 лет, в 1860 г., доля США в мировом промышленном производстве достигла 15%. Экспансия на Запад и необходимость связать сельскохозяйственные районы Запада с промышленным Востоком вызвали бурное железнодорожное строительство, стимулировавшее в свою очередь развитие черной металлургии.

Потребности сельского хозяйства, промышленности и транспорта обусловили быстрый рост машиностроения. В 1834 г. Сайрус Мак Кормик изобрел молотилку, примерно к этому же времени относится изобретение уборочных машин. В 30-х годах в США работало уже несколько машиностроительных заводов и много машин ввозилось из-за границы, главным образом из Англии. В 1807 г. Фултон изобрел пароход, а к 1860 г. по водным путям США курсировало уже более тысячи пароходов.

Гражданская война между рабовладельческим Югом и промышленным Севером, разразившаяся в 1861—1865 гг., явилась новым толчком для развития промышленности. К 1870 г. США по уровню промышленного производства перегнали Францию и Германию: их доля в мировом производстве достигла 23%. Особенно выросла машиностроительная промышленность США, в частности производство локомотивов и сельскохозяйственных машин. В 1881—1885 гг. доля США в мировом промышленном производстве достигла 29%. Еще через 10 лет США обогнали Англию по выплавке чугуна, производству стали и добыче угля, а к концу века вышли на первое место в мире по уровню производства промышленной продукции.

История экономического развития США является наиболее ярким примером взаимоотношений между техникой и наукой в годы промышленного переворота и в последующий период: первенствующим является развитие техники и техника ставит задачи науке, если в этом возникает необходимость. Мы видели, что в XVIII в. техника (или, точнее, ее представители) не считала нужной помощь науки: развитие техники и науки шло самостоятельными путями, хотя, конечно, развитие науки в ее важнейших направлениях было обусловлено проблемами техники (или практики). В XIX в. техника уже требует помощи от науки, но это еще не обязательное условие ее развития: в США техника развивалась такими быстрыми темпами, что наука осталась позади, во всяком случае на втором плане. Мы видели, что и в Англии в первой половине XIX в. наука, обслуживавшая технику, не обгоняла ее в своем развитии; в США темпы были выше и соответствующее положение науки ниже, чем в Англии.

История инженерного образования в США также напоминает соответствующую картину в Англии: здесь так-

же высшие технические школы начали развиваться относительно поздно и потребности промышленности в техническом персонале удовлетворялись за счет индивидуального ученичества. Это имело, естественно, и свою хорошую сторону: ценились не звания, а знания, но уже к середине XIX в. обнаружилось, что рассчитывать на талантливую людей нельзя, нужны и рядовые работники, а их нужно учить.

Первой технической книгой, изданной в США, стало переведенное с французского языка руководство для военных инженеров³⁶ — книга была предназначена служить руководством для офицеров революционной армии. В 1802 г. в Вест-Пойнте решением Конгресса США была основана Военная академия, ставшая первым техническим учебным и научным центром страны. В 1817 г. она была реорганизована по французскому образцу и в ней повышена роль теоретических наук. В качестве учебника прикладной механики академия приняла «Курс механики» О. Грегори. В 1826 г. было издано учебное пособие «Руководство для гражданских инженеров»³⁷, вторая техническая книга в США.

В 1822 г. один из провинциальных лицеев в штате Мэн сделал попытку начать подготовку техников, которая не увенчалась успехом из-за отсутствия необходимых средств. В 1824 г. Стефан Ван Ринселер основал в Трое, штат Нью-Йорк, школу «для подготовки лиц, которые смогут прилагать науки к обычным целям жизни», — Ринселеровский политехнический институт. «Под руководством Амоса Итона, как старшего профессора (1824—1842), Ринселеровский институт с успехом применил новые методы и новые дисциплины к американскому учебному курсу. Студенты института в Трое обучались на лекциях, практических занятиях, экспериментальных демонстрациях. Обучение для них начиналось с практического применения знаний. Так, посещение белильной мастерской, сыромятни или жерновщика предшествовало соответствующим лабораторным занятиям»³⁸.

В 1835 г. Ринселеровский институт выпустил четырех дипломированных гражданских инженеров. Вскоре после-

довало открытие и других технических школ: в 1847 г. были открыты технические колледжи при Гарвардском и Йельском университетах, в 1853 г. — при Мичиганском университете. В 1854 г. был основан Бруклинский политехнический институт, в 1861 — Массачусетский технологический.

Однако всего этого было недостаточно, тем более что количество выпускников было небольшим: с 1835 по 1866 г. шесть технических школ выпустили только 300 инженеров. Принятый Конгрессом США в 1862 г. Акт о земле (Merill Land Grant Act) изменил положение в системе технического образования. Уже в 1870 г. в стране действовала 21 инженерная школа, выпустившая к этому году 866 инженеров. Повысилась и интенсивность технического творчества. С 1790 по 1860 г. Патентное бюро США выдало 36 тыс. патентов, а за 1860—1890 гг. — более 440 тыс.; при этом значительная часть патентов относилась к машиностроению. Из наиболее ранних изобретений особенно интересными были работы Уитни и одного из самых интересных изобретателей века, Оливера Иванса (Oliver Evans, 1755—1819). Первым его изобретением была автоматическая мельница. Это была вторая в мире (после змеиногорской установки К. Фролова) автоматическая система машин и первая технологическая система. Его решение технологического процесса мельницы было гениальным и именно поэтому не понято современниками. Он работал затем над паровой машиной и здесь добился существенного успеха, создал своеобразную систему парового котла и предложил проект судна, движущегося и по суше, и по воде. Однако этот гениальный американец родился слишком рано. Значительно большего успеха добился Вестингауз³⁹, получивший около 400 патентов. В 1866 г. он изобрел железнодорожный тормоз.

Американские технические школы середины столетия развились на Вест-Пойнтскую академию. Установленная в ней система обучения напоминала систему Политехнической школы, но в ней не было того, чем была сильна Политехническая школа, — настоящей науки. То же

³⁶ Chevalier de Clairac. Field Engineer, 1776.

³⁷ M. J. Sganzin. Elementary Course in Civil Engineering, 1886.

³⁸ F. Rudolph. The American College and University a History. N. Y., 1968, p. 230.

³⁹ Джордж Вестингауз (George Westinghouse, 1846—1914). В 1867 г. получил первый патент на торможение сжатым воздухом. Работал над совершенствованием тормозных систем, в 1872 г. предложил систему автоматического торможения. Всего получил около 400 патентов на тормозные системы.

наблюдалось и в других технических школах: «Большие мастера математического изложения установили способ обучения, который критиковался как чересчур строгий и непрактичный. Так называемые школьные репетиции не выполняли своего назначения, лабораторий почти не было, результаты экспериментальных исследований выражались в математической форме и преподносились с помощью авторитета книги; пока преподаватель на другом конце стола производил элементарные опыты, класс только наблюдал и в лучшем случае делал заметки»⁴⁰. Уровень знаний учащихся также не был высоким. В той же Вест-Пойнтской академии с 1850 по 1887 г. механика преподавалась по учебникам профессора Барлетта, читавшего ее там с 1834 по 1870 г. Один из них — «Синтетическая механика» — был переработкой «Индустриальной механики» Понселе, а другой — «Элементы аналитической механики», изданный в 1853 г., содержал механику твердого тела, механику жидкостей, молекулярную механику (о которой в Европе уже забыли) и приложение механики к «простым машинам».

Едва ли можно говорить о наличии серьезной науки в США (мы имеем в виду науку о машинах) примерно до 70-х годов XIX в. Но среди немногих ученых «высокого класса» был знаменитый Гиббс⁴¹, докторская диссертация которого, опубликованная в 1863 г., была посвящена профилированию зубчатых колес («On the Form of the Teeth of Wheels in Spur Gearing»). В 1860 г., за шесть лет до Вестингауза, Гиббс сконструировал железнодорожный тормоз. С 70-х годов положение в американской науке несколько меняется: растет интерес как к теоретическим, так и к прикладным знаниям. С 1869 г. начал выходить журнал Ван Ностренда «Engineering Magazine», в 1880 г. организовано Американское общество инженеров-механиков (American Society of Mechanical Engineers), начало развиваться самостоятельное научное творчество в области математики. Значительную роль здесь сыграл английский ученый Джеймс Джозеф Сильвестер.

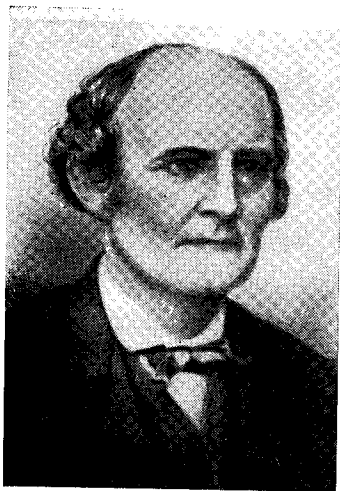
⁴⁰ *Girvin. A historical Appraisal of Mechanics*, p. 543—544.

⁴¹ Джозайя Уиллард Гиббс (Josiah Willard Gibbs, 1839—1903) — физик-теоретик, один из основоположников статистической механики. Учился в Париже, Берлине и Гейдельберге. С 1871 г. — профессор Йельского университета.

К середине XIX в. Англия еще не создала системы высшего технического образования, хотя вопрос об этом уже оживленно дискутировался, поскольку англичане начали торчать свое промышленное и техническое первенство. С 1870 по 1900 г. промышленная продукция Англии возросла только в 1,7 раза, а России — в 4,5, США — в 4,1, Германии — в 3,7, Франции — в 2 раза. К концу века США по производству промышленной продукции обогнали Англию, а Германия постепенно достигала ее уровня. Одной из причин сложившегося положения было то, что Англия первой в мире прошла стадию промышленного переворота и приобрела лучшее в мире механическое вооружение, которое к началу третьей четверти века оказалось безнадежно устаревшим. Кроме того, у английских инженеров была пычка, но не было школы. В 1870 г. в Англии было семь учебных заведений для подготовки гражданских инженеров, в пяти из которых было лишь по одному преподавателю, и совсем не было лабораторий.

В 1875 г. была создана «королевская комиссия» по вопросам технического образования, которая рекомендовала Лондонскому муниципалитету открыть в Лондоне городской гильдейский институт для поощрения преподавания прикладных знаний. Институт был открыт в 1880 г. и в течение нескольких лет основан ряд ремесленных и технических колледжей.

В 1882 г. была создана еще одна королевская комиссия по вопросам технического образования, в ее материалах, в частности отмечалось, что промышленники не только не помогают, но, наоборот, чинят всяческие препятствия при организации технических школ, опасаясь раскрытия своих производственных секретов. По рекомендации комиссии в Лондоне и других городах страны было основано несколько технических школ. И все же система технического образования, подобная системам других стран, в Англии в этот период не была создана. Поэтому исследования в области прикладных наук остались одной из функций научной работы университетов, в которых, однако, финансовыми возможностями для научной работы обладали лишь некоторые старые кафедры, не имевшие отношения к техническим наукам. Быть может, этим объясняется то парадоксальное обстоятельство (характерное лишь для Англии), что наибольшие достижения в области технической кинематики в первой половине



А. Кэйли

XIX в. принадлежали богословам, а во второй половине — юристам.

Большой вклад в развитие кинематики внесли два больших друга — Артур Кейли и Джеймс Джозеф Сильвестер. Артур Кейли (Arthur Cayley, 1821—1895) до 1838 г. жил в Петербурге, а в 1838 г. поступил в Кембриджский университет, который окончил в 1841 г. с высшими степенями отличия. Тогда же он начал исследования в области математики, а в 1843 г., не прерывая математических занятий, занялся адвокатурой, Феликс Клейн утверждает⁴², что основные работы Кейли относятся именно к этому периоду.

С 1863 г. он был профессором Кембриджского университета.

Основные работы Кейли относятся к алгебраической геометрии и теории инвариантов. Важные исследования он выполнил также в механике, астрономии и кинематической геометрии, доказав, в частности, что шатунная кривая является кривой шестого порядка⁴³. Ему принадлежат также работы по исследованию плоского движения, в том числе кривых третьего, четвертого и шестого порядков. Кейли был очень работоспособным человеком: полное собрание его мемуаров вышло в 13 больших томах. Он читал все, относящееся к математике, и прославился как выдающийся знаток математической литературы.

Джеймс Джозеф Сильвестер (James Joseph Sylvester, 1814—1897) учился в частной школе, а затем в Ливерпульском институте и Кембриджском университете, ко-

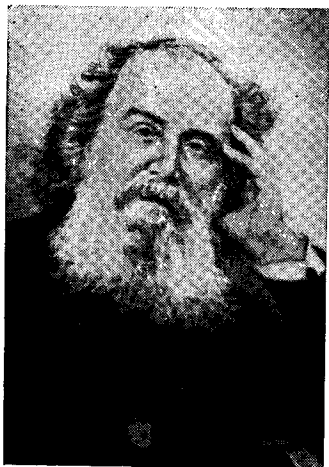
торый окончил в 1837 г. К этому же времени относятся и его первые исследования, в результате которых он уже в 1839 г. получил профессию по натурфилософии в Лондонском университетском колледже и был принят в Лондонское королевское общество. В 1840 г. его пригласили в Виргинский университет на должность профессора математики. Но в Америке Сильвестер долго не задержался из-за резких высказываний по поводу рабства негров, что и тогда считалось в южных штатах серьезнейшим признаком неблагонадежности. С 1844 по 1854 г. он работал актуарием в одном из лондонских страховых обществ; к этому периоду относится начало его дружбы с Кейли. В эти годы он опубликовал много работ и выдвинулся в число ведущих математиков мира. В 1854 г. Сильвестер получил место профессора математики в Вульвичской военной академии, где проработал до 1870 г. В 1877 г. он был избран профессором университета Джона Гопкинса в Балтиморе, где не только преподавал, но и занимался организацией научно-исследовательской работы в области математики, в частности, был первым редактором журнала «American Journal of Mathematics», в котором опубликовал свыше 30 своих статей. В 1883 г. он вернулся в Англию и был избран на кафедру геометрии в Оксфордском университете.

Сильвестер работал в тех же областях математики, что и Кейли. Свои основные работы он посвятил алгебре, теории инвариантов и матриц. Ряд его исследований относится к кинематике механизмов, кинематической геометрии и теории механического воспроизведения математических зависимостей. Он написал мемуары о преобразовании подобных движений, об изобретенном им пантографе, занимался преобразованием прямолинейного и кругового движений, теоретически исследовал инверсор Линкина — Поселье, несколько раньше Кемпе работал над теорией инверсора, впоследствии получившего имя Кемпе, несколько обобщил задачу преобразования движений, предложив ряд схем преобразователей прямолинейного или кругового движения в движение по кривой третьего порядка, занимался и вопросами структуры механизмов: двухповодковая группа, как известно, называется селвестровой диадой.

Интересно, что заниматься кинематикой механизмов Сильвестер начал по совету П. Л. Чебышева.

⁴² Ф. Клейн. Лекции о развитии математики в XIX столетии. М.—Л., ОНТИ, 1937, стр. 184.

⁴³ A. Cayley. Three-Bar Motion.— «Proceedings of the London Mathematical Society», 1876, t. VII, p. 136.



Д. Д. Сильвестер

Как и Кейли, Сильвестер был хорошим лингвистом, даже писал стихи на английском и латинском языках, но не любил читать исследований других математиков, иногда забывал и о своих результатах. Был очень остроумным оратором и интересным собеседником, любил музыку: по его словам, музыку можно определить как математику чувства, а математику — как музыку разума.

В 70-х годах XIX в. английские ученые большой цикл работ посвятили теории инверсоров; непосредственными причинами, вызвавшими интерес к этой теории, были исследования

П. Л. Чебышева о приближенном решении задачи преобразования движения и точное решение Липкина — Поселле.

Задача о точном преобразовании прямолинейного движения в круговое была поставлена в 1864 г. французским военным инженером Поселле⁴⁴ в виде следующего письма в журнале «Nouvelles Annales de Mathématiques».

«Честь имею предложить Вашим читателям следующие вопросы, которые, как мне кажется, представляют немаловажный интерес.

Я называю составным циркулем шарнирное соединение рычагов, способных двигаться в определенном направлении. Таким является, например, шарнирный четырехзвенник с подвижными вершинами и с одной закрепленной стороной.

Шарнирный параллелограмм Уатта и некоторые точные приборы, как, например, пантограф, полярный планиметр и иные, относятся к тому же виду.

⁴⁴ Шарль Никола Поселле (Charles-Nicolas Peacellier, 1832 — 1913). Окончил Политическую школу (1852), служил в инженерных войсках. Дивизионный генерал (1888).

Циркуль с подвижной ножкой, вращающейся около неподвижной, является простым случаем составного циркуля.

Предлагается найти составные циркули, с помощью которых можно описать непрерывным движением:

- 1) прямую линию,
- 2) окружность любого радиуса,
- 3) конические сечения.

Конструкция подобного циркуля, исключая любое проскальзывание и годная для черчения указанных кривых, должна давать предельную точность.

Случай прямой линии интересен, так как он дает точное решение той проблемы, приближенное решение которой было выполнено параллелограммом Уатта⁴⁵.

Эта задача была решена в 1868 г. Л. И. Липкиным⁴⁶, который изобрел семизвенный механизм для точного преобразования прямолинейного движения в круговое и в 1870 г. представил в Петербургскую академию наук мемуар, озаглавленный «Об одном шарнирном прямиле». Мемуар был рассмотрен П. Л. Чебышевым, который чрезвычайно одобрительно отнесся к изобретению Липкина и предложил опубликовать мемуар в «Бюллетене» Академии наук за 1871 г. В том же году мемуар был опубликован в Бельгии, а годом позже — в «Mélanges mathématiques et astronomiques». Таким образом приоритет в изобретении остался за Липкиным. Лишь в 1873 г. подобное решение нашли сам Поселле⁴⁷ и другой французский математик — Лемуан⁴⁸.

Эта задача положила начало важному разделу теории механизмов, посвященному точному воспроизведению математических зависимостей. В конце января 1874 г. Сильвестер прочел в Лондонском королевском институте популярную лекцию на тему «Последние открытия в меха-

⁴⁵ «Nouvelles Annales de Mathématiques», 1864, 2-e s., v. 3, p. 414—415.

⁴⁶ Л. И. Липкин (1851—1875). Учился в Берлинском университете, затем в Петербурге у П. Л. Чебышева. Умер 24 лет от туберкулеза.

⁴⁷ Peaucellier. Note sur une question de géométrie de compas. — «Nouvelles Annales de Mathématiques», 1873, 2-e s., t. XII, p. 71—78.

⁴⁸ Lemoine. Note sur la losange articulé du commandant du Génie Peaucellier destiné à remplacer le parallélogramme de Watt. — «Journal de Physique théorique et appliquée», 1873, t. X, p. 130—134.

ническом преобразовании движения»⁴⁹, в которой, в частности, заметил, что «точное параллельное движение Поселле выглядит настолько просто, а осуществляется так легко, что почти все, кто видел этот механизм в работе, удивляются, как это случилось, что он не был открыт уже давно. Но,— продолжал Сильвестер,— меня больше удивляет то, что он вообще был открыт, и я совершенно не вижу причины, почему бы его не могли открыть уже сотню лет назад. Ведь априори для этого изобретения не было никакого основания. Ведь оно не имеет даже отдаленной аналогии с параллелограммом Уатта или с его производными»⁵⁰. Сильвестер упомянул о том, что маленькой модели инверсора был оказан на обеде в Философском клубе Королевского общества восторженный прием, «когда она была принесена вместе с десертом для обозрения после обеда в соответствии с похвальным обычаем членов этого почтенного общества знакомить друг друга с последними научными новинками»⁵¹.

Постановка задачи об инверсоре заинтересовала Сильвестера, и он начал исследования в этом направлении. Путем значительного усложнения механизма инверсора дополнительными звеньями он получил механизмы для извлечения квадратных и кубических корней, для деления угла на три части. Сильвестер установил, что механически можно воспроизводить не только прямую линию и окружность, но и более сложные кривые. При этом вид и порядок кривой зависят от выбора в механизме неподвижных точек и изображающей точки. Он установил также, что путем соединения простых механизмов получаются сложные, которые могут воспроизводить новые кривые. Он считал, что возможности механизмов в этом направлении неисчерпаемы⁵². Метод исследования Сильвестера очень напоминает метод теоретико-экспериментального исследования П. Л. Чебышева. В 1872 г., по представлению Чебышева, Сильвестер был избран членом-корреспондентом Петербургской академии наук.

⁴⁹ *Sylvester. Recent Discoveries in Mechanical Conversion of Motion.*— «Notices of the Proceedings, Royal Institute», 1873—1875, v. 7, p. 179—198.

⁵⁰ Там же.

⁵¹ Там же.

⁵² Там же, с. 191.

В 1874 г. начал печатать сообщения о своих исследованиях в области шарнирных механизмов преподаватель математики Вульвичской военной академии Г. Гарт⁵³. Предложенный им инверсор состоял не из восьми звеньев, как механизм Линкина — Поселле, а из шести. Однако недостатком механизма Гарта были чересчур большие размеры звеньев по сравнению с длиной отрезка выполняемой им прямой. В качестве основной части своего механизма Гарт использовал антипараллелограмм. Некоторое обобщение инверсора Гарта предложил Сильвестер: от строил на сторонах антипараллелограмма, как на основаниях, подобные треугольники⁵⁴, получая таким образом «четырёхплоскостной» инверсор. Дальнейшие исследования Гарта относились к теории шарнирных механизмов.

Летом 1876 г. молодой адвокат Альфред Брей Кемпе⁵⁵, несколько лет занимавшийся исследованием шарнирных механизмов, в частности механизмами для решения алгебраических уравнений, прочитал лекцию «Как провести прямую линию», где изложил не только предлагаемый им метод преобразования вращательного и поступательного движения, но и историю вопроса⁵⁶. «Для оправдания необходимости инверсора Поселле Кемпе исходит из того положения, что точная окружность может быть воспроизведена при помощи звена, вращающегося вокруг центра и снабженного карандашом, тогда как изображение прямой линии до предположения капитана Поселле было значительно более трудным, если вообще возможным. Правда, прямую линию можно провести вдоль прямого ребра линейки, но можно ли доказать, что ребро в действительности прямое? Не ослабил он своих аргументов и замечанием, что для этой цели можно было воспользоваться и куском резины. Кемпе сотрудничал с Сильвестером в раз-

⁵³ On certain conversion of motion, *Messenger of Mathematics*, 1874, v. IV, p. 82—86, 116—120. Report of the 44 Meeting of the British Association for the Advancement of Science. Meeting of Belfast, 1874.

⁵⁴ *Sylvester. On the plagiograph.*— «Nature», 1875, v. 12, p. 214.

⁵⁵ Альфред Брей Кемпе (Alfred Brey Kempe, 1849—1922). Окончил Кембриджский университет. Работал адвокатом (barrister in law) в Лондоне. С 1881 г. член Королевского общества.

⁵⁶ A. B. Kempe. How to draw a straight Line.— «Nature», 1877, v. 16, p. 65—67, 86—89.

витии его идей, результатом чего явился инверсор Сильвестера — Кемпе»⁵⁷.

Исследования шарнирных механизмов были посвящены и другие работы Кемпе. «Кемпе сформулировал и доказал теорему о возможности воспроизведения алгебраической кривой любого порядка кинематической цепью, образованной одними низшими кинематическими парами. Эти кинематические цепи Кемпе рассматривает как совокупность кинематических цепей, каждая из которых воспроизводит элементарное геометрическое или алгебраическое действие. Принципом Кемпе пользуются современные ученые и конструкторы при проектировании сложных счетно-решающих устройств, применяющихся в задачах автоматики и кибернетики»⁵⁸.

Кемпе построил целую серию шарнирных механизмов, в том числе механизмы для построения равных углов и углов, кратных заданному, механизм для сложения углов («сумматор Кемпе»), а также ряд других.

Исследованиями в направлении шарнирных механизмов занимался и другой лондонский адвокат — С. Робертс⁵⁹, математической специальностью которого была теория алгебраических кривых. Этот юрист, любитель шахмат и рыбной ловли, философ и токарь, был также любителем-механиком и конструктором электрических машин. В 1875 г. он доказал известную теорему о трех шарнирных четырехзвенниках, воспроизводящих одну и ту же шатунную кривую, которую независимо от Робертса, доказал и Чебышев. Робертс занимался также теорией приближенного воспроизведения прямой линии. Его механизм представлял шарнирный четырехзвенник, шатун которого служил основанием для жесткого равнобедренного треугольника; шатунная кривая, которую чертила вершина треугольника, на некотором интервале приблизительно совпадала с прямой линией. Ряд работ Робертс

посвятил исследованию свойств шатунных кривых; над этими вопросами он работал одновременно с Кейли.

Таким образом, интерес к теории шарнирных механизмов, вызванный работами Чебышева и начавшийся с попыток приближенного и точного воспроизведения прямой и окружности, уже в третьей четверти XIX в. дал ряд интересных выходов. Была создана теория воспроизведения кривых линий при помощи механических средств, заложены основы точного и приближенного синтеза механизмов и шарнирные механизмы рассматривались уже не как редкий и интересный случай механизма, годного для частного воспроизведения определенного вида движения, а как очень важный и общий класс механизмов, теория которых могла разрешить многие недоуменные вопросы машиностроения.

Чебышев продолжал свои исследования. В ряде работ 70-80-х годов, используя свойства симметричных шатунных кривых, он строит шарнирные механизмы с остановками, шарнирные механизмы для передачи вращательного движения при некоторых специальных условиях и создает ряд механизмов, могущих иметь практическое применение, — самокатное кресло, гребной механизм, «велосипед», «сортировальку», парадоксальный механизм. В России теорией шарнирных механизмов занимался также В. Н. Лигиш, который, в частности, в 1883 г. составил библиографию работ по шарнирным механизмам (он разыскал 80 работ), и ученики Чебышева П. О. Сомов и Б. Н. Делоне. Интересные работы выполнил во Львове профессор Львовской технической академии Л. Жмурко⁶⁰. Им были созданы приборы для черчения кривых: конограф, эллипсограф, эллипсопараболограф, циклоидограф, а также интегратор, которые демонстрировались на ряде выставок. Продолжателем работ Жмурко стал доцент Львовского политехнического института Бруно Абданк Абаканович (1852—1900), уроженец Литвы, выпускник Рижского политехникума. Им было создано несколько типов математических

⁵⁷ F. S. Ferguson. Kinematics of Mechanisms from the Time of Watt. Washington DC, 1962, p. 207.

⁵⁸ И. И. Артоболевский. Теория механизмов для воспроизведения плоских кривых. М., Изд-во АН СССР, 1959, с. 251.

⁵⁹ Самюэль Робертс (Samuel Roberts, 1827—1913) — адвокат. В 1849 г. награжден золотой медалью Лондонского университета за математические работы. Член Королевского общества (1878), президент Британского математического общества (1880).

⁶⁰ Лаврентий Жмурко (Wawrzyniec Zmurko, 1824—1889). Учился на философском факультете Львовского университета, затем в Венском университете и Венской технической академии. Профессор Львовской технической академии (1851). Профессор математики Львовского университета (1870). Член Краковской академии наук (1873).

приборов и инструментов: интегратор, интеграф, параболограф, спирограф и др.

Очень интересный курс прикладной механики читал в Льежской горной школе последователь Чебышева профессор В. Двельсхаверс-Дери⁶¹. Курс открывается определением машин: «Машина есть ансамбль частей, способных сопротивляться и расположенных таким образом, что под влиянием сил, долженствующих привести их в движение, они смогут воспроизвести лишь предписанные движения, определенные как относительно направления, так и скорости». Это определение, почти одновременное с определением Рело, свидетельствует о новой ступени в развитии теории. Очень большое место в программе уделяется ознакомлению с идеями Чебышева. Автор начинает книги с применения метода Чебышева к вычерчиванию профилей зубьев колес. Вторая глава посвящена теории составных механизмов и методу Чебышева и открывается теорией параллелограммов. Интересно, что автор называет параллелограмм, послуживший объектом спора, параллелограммом Липкина.

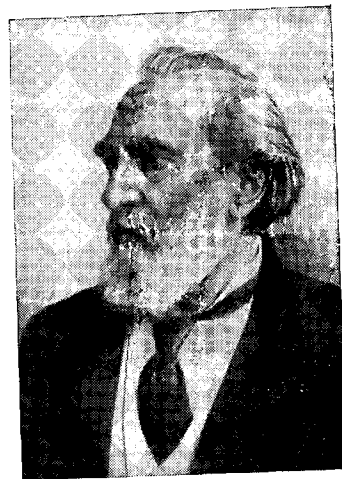
В третьей четверти века шарнирные механизмы попадают также в поле зрения немецких ученых, ведущая роль здесь, несомненно, принадлежит крупнейшему немецкому машиноведу Рело, который в значительной степени обогатил учение о машинах.

Экономика Германии в последней четверти века развивалась очень быстрыми темпами. Таможенный союз 1834 г., объединивший в одну систему большинство немецких государств, и революция 1848 г. создали предпосылки для капиталистического развития страны. В течение 50—60-х годов в Германии утроилась железнодорожная сеть, что стимулировало развитие черной металлургии, а также торговли. Запоздание промышленного переворота в Германии дало ей возможность использовать опыт экономического развития Англии и Франции. Победы в войнах над Австрией в 1866 г. и над Францией в 1870—1871 гг. резко ускорили процесс индустриализации страны. «...Пап промышленный переворот, — писал Энгельс в письме к А. Бебелю, — приведенный в движение револю-

цией 1848 г. с ее буржуазными достижениями (как бы слабы они ни были), был в громадной степени ускорен благодаря 1) устранению внутренних преград в 1866—1870 гг. и 2) французским миллиардам, которые в конце концов должны были получить капиталистическое применение. Таким образом, мы достигли промышленного переворота более радикального и глубокого, развернувшегося на большем пространстве и более всеобъемлющего, чем в других странах, и имея при этом совершенно свежий, нетронутый, не деморализованный поражениеми пролетариат...»⁶²

Резкий скачок в развитии металлургического и машиностроительного производств (по машиностроению Германия вышла к концу XIX в. на первое место в Европе) стимулировал развитие соответствующих отраслей науки и техники.

К этому периоду и относится расцвет творчества Рело. Франц Рело родился 30 сентября 1829 г. в Эшвейлере, близ Ахена, в семье, для которой техника была традиционным занятием. Получив начальное образование в школе и некоторую техническую подготовку в семье, он начал работать на заводе, сперва учеником, а затем конструктором и техником. Работая, он усиленно занимался самообразованием, в частности изучал труды Редтенбахера. С 1850 по 1852 г. он слушал лекции в Политехническом институте в Карлсруэ, всецело находившемся в те годы под влиянием Редтенбахера. Значение Редтенбахера для немецкой технической школы не ограничивалось его исследованиями в области прикладной механики. Он сам говорил: «Мои педагогические стремления направлены не только на развитие научной теории машины, но и на повышение



Ф. Рело

⁶¹ W. Dwelshauwers-Dery. Programme des cours de Mécanique appliquée et de Physique industrielle professés à l'école des mines de Liège. Mons, 1876.

⁶² К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 36, с. 216—217.

культуры лиц, занятых в промышленности». Следуя указаниям своего учителя, Рело кроме технических предметов изучал историю и английский язык. По окончании института он некоторое время учился в Берлинском и Боннском университетах, где изучал естественные науки и философию.

Еще в студенческие годы Рело начал работать над исследованиями в области машиностроения. В 1854 г. он в соавторстве с Моллем издал первый том «Конструирования в машиностроении». В 1856 г. Рело был приглашен на должность профессора механико-технического отделения Цюрихского политехникума, где ему пришлось работать вместе с Цейнером⁶³ и Кульманом. В 1864 г. он перешел в Берлинский ремесленный институт на кафедру машиностроения. В 1866 г. этот институт (основанный в 1821 г.) был преобразован в Ремесленную академию, директором которой Рело пробыл с 1867 по 1879 г. В 1879 г. на базе Ремесленной и Строительной (основанной в 1799 г.) академий было основано Берлинское высшее техническое училище.

В Германии в первой половине века кинематикой не занимались. Впервые этот предмет Рело начал читать в Швейцарии, в Цюрихском политехникуме, в 1871 г. Затем продолжил его в Берлинском ремесленном институте, а позже — в Ремесленной академии. Одновременно он начал издавать «Кинематические сообщения» и другие мемуары по прикладной теории машин. Несколько позже начал чтение курса кинематической геометрии Аронгольд, затем Шелль⁶⁴ издал трактат по теоретической механике «Теорию движения и сил», в котором значительное внимание уделил кинематике. В 1875 г. Рело опубликовал первый том «Теоретической кинематики».

Рело был не только ученым, но и практиком: он был членом жюри на международных выставках в Париже

⁶³ Густав Цейнер (Gustav Zeuner, 1828—1907) — ученый в области машиностроения и прикладной механики. Профессор и директор Цюрихского политехникума (1854), директор Фрайбергской горной академии (1871), профессор и директор Дрезденского политехнического института (1873—1897).
⁶⁴ Вильгельм Шелль (W. J. F. N. Schell, 1826—1904). Учился в Марбурге и Берлине. Профессор математики Марбургского университета (1851), профессор теоретической механики и синтетической геометрии политехникума в Карлсруэ (1861).

(1867), Вене (1873), Филадельфии (1876), в Сиднее — Мельбурне (1879—1881). Анализируя состояние германской промышленности, он требовал повышения качества ее изделий. Немецкие экспонаты на Филадельфийской выставке он охарактеризовал убийственным «billig und schlecht» (дешево и плохо). Критически относился он и к милитаристским тенденциям в развитии германской промышленности. В первом «Письме из Филадельфии» Рело, например, писал: «Посмотрим в машинном зале: кажется, что семь восьмых пространства отведено под огромные пушки Круппа, «машины для убийства», как их назвали, которые стоят как угроза всем мирным изделиям, выставленным другими нациями! Неужели в этом заключается выражение немецкой мысли?»⁶⁵

Рело много работал и в области истории техники. В «Теоретической кинематике» истории машин посвящена отдельная глава (изданная также и отдельным оттиком). Введение, примечания к отдельным параграфам трактата также насыщены историческими сведениями. Можно сказать, что Рело подходил исторически к исследованию всех вопросов кинематики.

Как и его учитель Редтенбахер, Рело любил искусство. Он перевел на немецкий язык «Песнь о Гайавате» Лонгфелло, много рисовал и гравировал по дереву, писал о «художественном стиле в машиностроении». Его «Путешествие по Индии» — блестящий образец художественной прозы. Рело был прекрасным лектором, умевшим заинтересовать и увлечь слушателей: «Лекции Рело можно назвать блестящими по обработанности и изяществу изложения; лекции по кинематике интересны по оригинальности изложения», — так отзывался о них Ф. Е. Орлов. В Берлинском высшем техническом училище Рело создал кабинет кинематических моделей (свыше 800 моделей), долго служивший образцом для высших технических школ Германии и других стран.

Рело пользовался большим авторитетом среди ученых в области прикладной механики. Но у него было и много противников, борьба с которыми зачастую принимала с обеих сторон резкие формы и особенно обострилась на рубеже столетий.

Умер Рело 20 августа 1905 г.

⁶⁵ F. Reuleaux. Briefe aus Philadelphia. Braunschweig, 1877, S. 6.

Над идеями «Теоретической кинематики»⁶⁶ Рело работал, как указывает он сам, с 1852 г. Таким образом, этот большой трактат явился результатом почти 25-летней интенсивной конструкторской, педагогической и научной деятельности.

Во введении Рело излагает краткую историю науки о машинах. Разбирая труды своих предшественников, он приходит к выводу, что в сущности кинематика как наука еще не создана. Каждая наука характеризуется определенной системой. В технической науке такая система должна не только пояснять, но и помогать создавать новое, в частности, в механике машин система должна облегчить создание новых механизмов, однако, говорит Рело, ни одна из предшествовавших систем новых механизмов не создала.

Первая глава содержит изложение основных принципов науки. Рело утверждает, что науку о машинах следует разделить на четыре отдельных дисциплины: собственно науку о машинах, которая должна заниматься описанием существующих машин; теорию машин, которая является применением механики к машинам и объектом изучения которой должны быть машины-двигатели, а отчасти и рабочие машины; учение о построении машин и кинематику, или теорию механизмов.

«Машина, — пишет Рело, — есть соединение сопротивляющихся тел, устроенное так, чтобы понудить механические силы природы действовать для выполнения определенных движений». Машина состоит из пар элементов. Элементы, соединенные друг с другом с помощью кинематических пар, образуют кинематическую цепь. Цепь принужденного движения Рело называет десмодромной (от греческих слов *δεσμος* — связь, *δρομος* — путь) и с нею связывает понятие механизма: механизм является замкнутой кинематической цепью принужденного движения, одно из звеньев которой закреплено (является стойкой). Следовательно, из каждой цепи можно получить столько механизмов, сколько она имеет звеньев. Последнее положение является одним из основных в теории Рело.

Связь между понятиями механизма и машины принимает затем у Рело следующую форму: если мы понудим одно из звеньев механизма с помощью некоторой силы изменить первоначальное положение, то получим машину.

⁶⁶ F. Reuleaux. Theoretische Kinematik, Bd. I. Braunschweig, 1875.

Как видим, в определении машины Рело исходит совершенно из иного принципа, чем его предшественники. У них существование машины определялось наличием некоторых составных частей, а именно, двигателя, или приемника, передатчика и рабочего органа, или орудия. Иначе говоря, машина определялась аналитически. Идея Рело синтетична: он исходит из понятия кинематической пары и через понятия кинематической цепи и механизма переходит к определению машины. Вместе с тем определение Рело оказывается неполным: ему удовлетворяют и весы, и теодолит, и другие подобные приборы; таким образом, понятие машины расширяется, что едва ли необходимо.

Во второй главе изложены принципы форонии. Под этим названием Рело, пользуясь определением Аронгольда, понимает кинематическую геометрию. Сюда он относит понятия мгновенного центра вращения, полюдий, исследование движения.

Исследованию кинематических пар, центрального понятия кинематики Рело, посвящены третья и четвертая главы. Рело указывает, что существует лишь три вида низших обтекающих пар: вращательные, поступательные и винтовые. Высшими Рело называет пары, образуемые телами, которые могут вращаться около мгновенной оси, непрерывно меняющей свое положение. Он разбирает зависимые пары, образующиеся при силовом замыкании гибкими и жидкими элементами, пружинами. Кинематические цепи Рело исследует в пятой главе.

Некоторым «дивертисментом» представляются две следующие главы, посвященные изложению истории машин и символическому языку кинематики, который Рело считал одним из главных своих достижений, но он оказался таким же нежизненным, как и аналогичные предложения иных ученых.

Значительный интерес представляет восьмая глава о кинематическом анализе, под которым Рело понимает разложение механизма на цепи и пары, т. е. то, что мы называем структурным анализом. Прежде всего он применяет свой метод к исследованию «простых машин» и приходит к выводу, что они представляют собой собрание разнородных кинематических задач. Среди них есть замкнутые и с силовым замыканием пары (рычаг — вращательная пара, обычно с силовым замыканием, наклонная плоскость — призматическая пара также с силовым замыка-

нием, винт — винтовая пара) и кинематические цепи (клин — трехзвенная призматическая цепь, блок — трехзвенный механизм с неопределенным движением).

Много внимания Рело уделяет шарнирному четырехзвеннику и его преобразованиям. В сущности он считает четырехзвенник основным механизмом, из которого можно получить все остальные. Исследовав преобразования в плоскости, Рело переходит к сферическим механизмам и преобразованиям на сфере. При этом он указывает на родство, существующее между обеими задачами, ибо если центр сферы уходит на бесконечность, то в пределе ее поверхность вырождается в плоскость. Преобразуя сферический четырехзвенник по аналогии с плоским, Рело получает 24, а вместе с плоскими преобразованиями — 54 различных механизма, которые он разделяет на 12 классов. Анализируя затем в этой и следующей главах полученные путем преобразования механизмы, он приходит к выводу, что таким способом можно получить и новые механизмы.

В десятой главе Рело исследует большую группу шестеренных механизмов, служащих для передвижения жидкостей и газов. Здесь он впервые высказывает мысль о том, что элементы кинематических пар не обязательно должны быть твердыми телами. Далее Рело рассматривает системы зубчатых колес. Эпициклические механизмы он трактует как обычные многозвенные системы зубчатых колес, у которых изменено закрепленное звено.

В следующей, одиннадцатой, главе Рело анализирует конструктивные элементы машин. Эта глава является скорее эскизом исследования, так как высказанные соображения Рело не развивает. Условившись о том, какие элементы можно считать органами машин, он классифицирует их на основе их кинематической сущности.

Двенадцатая глава посвящена анализу понятия машины. Остановимся на ее содержании несколько подробнее, так как она послужила поводом к дискуссии о машине, разыгравшейся вскоре после выхода книги в свет. Начав с критики концепции французской школы, наиболее ярко выраженной в трудах Понселе, Рело приводит ряд примеров, которые, по его мнению, не соответствуют основному положению Понселе о трехчленном делении машины на двигатель, передачу и орудие. Например, станок, приводимый трансмиссией, не имеет двигателя; двигатель, взя-

тый сам по себе, не имеет никакого органа для исполнения работы, т. е. лишен орудия. Таким образом, по Понселе, паровой молот будет полной машиной, а паровая машина таковой не будет. Далее, в прядильном станке нить одновременно служит и для передачи движения. Чем ее следует считать — передачей или орудием? Где орудие у паропоза, парохода, можно ли считать крюк орудием?

На основании подобных рассуждений Рело приходит к выводу, что орудие не составляет необходимой части машины, а является лишь возможным ее элементом. По функциональному признаку Рело делит все машины на два класса: 1) машины для изменения положения, 2) машины для изменения формы. В машинах для изменения формы обрабатываемое тело с кинематической точки зрения представляет собой часть члена или полный член кинематической цепи: вместе с орудием оно образует пару, или кинематическую связь, в которой его первоначальная форма заменяется формой, соответствующей виду связи. То же наблюдается и в машинах для изменения положения: обрабатываемый (переносимый) материал вступает в кинематическую цепь с соответствующим органом машины. Следовательно, это является общим для обоих классов. И Рело приходит к выводу: чтобы при помощи машины получить тело определенной формы, необходимо, чтобы форма орудия была огибающей заданной поверхности. Этот вывод является одним из первых, если вообще не первым, относящимся к механике орудия.

Продолжая свои рассуждения, Рело утверждает далее, что ни орудие, ни привод, ни трансмиссия не являются обязательными составляющими машины; машина представляет собой замкнутую кинематическую цепь, причем передвигаемое или обрабатываемое тело является членом или кинематическим элементом этой цепи. Взамен общепринятой классификации Рело предлагает свою:

- а) главный механизм, в котором можно обнаружить приемник и орудие;
- б) распределитель с его подразделениями, питанием и отведением;
- в) механизм регулировки и остановки;
- г) механизм передачи.

Однако Рело отмечает, что и эта классификация несовершенна и что некоторые устройства в машинах могут попасть в разные ее подразделения.

Последняя, тринадцатая, глава посвящена синтезу механизмов. Рело различает прямой и непрямой синтез. Под прямым синтезом он понимает составление механизмов, которые могут обеспечить на заданном обрабатываемом теле определенные изменения места и формы. Такое составление возможно лишь в том случае, когда механизм приводится к паре и решение сводится к определению аксоидов элементов пары и к профилированию самих элементов. Однако здесь речь идет лишь о паре, а в рассмотрение должна в общем случае входить не отдельная кинематическая пара, а кинематическая цепь.

Поэтому основным методом составления новых механизмов Рело считает непрямой синтез, под которым подразумевает предварительное решение всех задач определенного типа, среди которых может оказаться и искомая. Может показаться, пишет он, что решение всех задач кинематики не возможно, но на самом деле это осуществимо, ибо количество возможных механизмов является ограниченным. В последних параграфах трактата Рело и рассматривает разного рода кинематические цепи.

«Теоретическая кинематика» Рело произвела на машиноведов большое впечатление. Уже через два-три года она была переведена на английский и французский языки и приобрела многих последователей в разных странах. К ним относились, в частности, В. Н. Лигин в России и А. Кеннеди в Англии. Во многих высших технических школах, немецких и иностранных, начали преподавать теорию механизмов «по Рело».

Вместе с тем целый ряд идей и определений Рело оказался недостаточно обоснованным и вызвал возражения. Дискуссию начал Т. Риттерсхаус⁶⁷ статьей, опубликованной в «Civilingenieur» («Гражданском инженерере») ⁶⁸ сразу же по выходе из печати книги Рело. Он отметил, во-пер-

⁶⁷ Траян Риттерсхаус (Trajan Rittershaus, 1843—1899). Учился в Цюрихском политехникуме в Берлинской ремесленной академии; математику слушал в Берлинском университете. Ученик Рело. Ассистент (1868), приват-доцент по кинематике (1873); экстраординарный профессор в Дрездене (1874), ординарный профессор (1882). Первый профессор в области теории электромашиностроения и конструирования электрических машин; электромашиностроением начал заниматься с 1877 г.

⁶⁸ T. Rittershaus. Zur heutigen Schule der Kinematik zugleich kritische Besprechung von Reuleaux's «Theoretische Kinematik». — «Civilingenieur», 1875, Bd. XXI, S. 425.

вых, что Рело слишком сузил понятие облекающих пар, что кроме указанных им элементами таких пар могут быть сфера, цилиндр без заплечиков и плоскость. Во-вторых, Рело не доказывает, а лишь декларирует свои положения. Например, рассматривая задачу о сведении движения в общем случае к вращательному и поступательному, он оставляет ее без доказательства. Возражает Риттерсхаус и против введения жидких и газообразных звеньев: они встречаются редко и к тому же, вступив в пару, часто теряют свои характерные особенности. Так, жидкая призма в сущности является лишь удлинением твердого звена. Поэтому, следуя Виллису, было бы лучше совсем опустить подобные звенья.

Особенные возражения встретила трактовка Рело понятия машины. По мнению Риттерсхауса, в этом вопросе Рело зашел слишком далеко: не следует перегружать кинематику исследованиями приемника и орудия, оставив первый физикам, а последнее — технологам. Ведь установить, что сегнерово колесо вступает с водой в кинематическую пару, нетрудно, но это ровно ничего не дает для решения технической задачи. Достаточно будет, если кинематика поможет решить чисто кинематические задачи, касающиеся двигателя и рабочей машины. Нащупал Риттерсхаус слабое место и в рассуждениях Рело о синтезе, которые остались всего лишь рассуждениями.

Однако Риттерсхаус все же высказывается в пользу «Кинематики» Рело, в которой, как он считает, подняты многие важные вопросы теоретического машиностроения.

В течение 1876 и 1877 гг. «Civilingenieur» напечатал несколько статей Т. Бека⁶⁹, который продолжил критику, начатую Риттерсхаусом, но в более резких тонах⁷⁰. В первой статье он рассматривает введенное Рело понятие закрепленного звена и приходит к выводу о неприемлемости для практики многих его положений. Он считает,

⁶⁹ Теодор Бек (Theodor Beck, 1839—1917) — один из первых историков машиностроения. Учился в Карлсруэ у Редтенбахера, оказавшего на него большое влияние. Много лет работал инженером в Германии и Англии.

⁷⁰ Th. Beck. Bemerkungen zu F. Reuleaux's Kinematik über Stützung. — «Civilingenieur», 1876, Bd. XXII, S. 571; Über den Begriff «Maschine», Bemerkungen zu F. Reuleaux's Kinematik. — 1877, Bd. XXIII, S. 441; Noch ein Wort über den Begriff «Maschine». — 1877, Bd. XXIII, S. 653.

например, что Рело, рассматривая механизмы в плоскости, порывает с реальностью и впадает в абстракцию. Значительная часть статьи Бека состояла из подобных выводов, в большинстве несправедливых.

Вторая статья Бека, посвященная анализу понятия машины, была более серьезной. Здесь Бек обратил внимание на некоторые положения Рело, которые действительно не были достаточно обоснованными. Бек начинает с исследования слов «машина», «механизм», «механика». Все они происходят от часто встречающегося у Гомера слова $\mu\eta\chi\omicron\varsigma$ — «вспомогательное средство». Следовательно, первоначальное значение слова «машина», т. е. латинское *machina* и греческого $\mu\eta\chi\alpha\lambda\eta$, означает «умело задуманное и искусно изготовленное вспомогательное средство». Понятие это непростое, и поэтому некоторые ученые, как, например, Понселе, уклонились от его определения, удовлетворившись косвенным описанием. Рело предложил определение, но совершенно недостаточное: под него попадают, в частности, и некоторые природные образования, например источники, что признает и сам Рело⁷¹. Это произошло потому, что его определение не включает понятия искусственности, т. е. не указывает на обязательность условия изготовления машины человеком. Далее Рело указывает, что целью машины является выполнение не механико-технической работы, а лишь «определенного движения». Следовательно, спимается разница между машиной и механизмом, что ведет к смешению обоих понятий. К машинам Рело относит также весы, геодезические и другие измерительные приборы, причем критерием в этом случае для него служит признак определенности движения. Однако целью подобных приборов является не выполнение определенных движений, тем более механической работы. Определенность движений в этих приборах служит для достижения иной цели. Например, движущее устройство телескопа может быть механизмом или машиной, но сам телескоп останется прибором. Поэтому их нелогично относить к машинам.

Бек предлагает следующее определение: «Машиной называется искусственное соединение сопротивляющихся тел, которое служит для выполнения определенной механико-технической работы и устроено с этой целью таким

образом, чтобы механические силы, действуя с его помощью, производили определенные движения»⁷².

На страницах того же «*Civilingenieur*» Рело выступил с возражениями⁷³. Настаивая на правильности и точности своего определения, Рело обвинил Бека в том, что из его исправленного определения выпадают такие, например, важные приборы, как часы и весы. «Весы — это не механизм, а целый ряд таковых и они составляют машину или, если хотите, аппарат, приспособление». Ведь называют же счетную машину Томаса машиной, продолжает Рело, ибо она является таковой и по имени и по существу, так как состоит из целого ряда соединенных между собой механизмов. Что касается понятий машины и механизма и различия между ними, то Рело считает, что достаточно ясно осветил этот вопрос: задачей механизма является преобразование движений, поэтому он — составляющая машины, но отнюдь не сама машина.

В третьей статье Бек опять настаивает на уточнении определений. Он утверждает, что в любом определении каждое слово имеет значение и поэтому слова следует подбирать так, чтобы избежать двусмысленного толкования. Наиболее напряженный спор возник вокруг толкования механической сущности весов, часов и теодолитов. Бек полагал, что их следовало бы называть не машинами, а измерительными инструментами, как это делал Редтенбахер. Тогда они найдут себе место и в научных исследованиях, ибо теория их частично относится к геометрии, а частично — к механике.

В дискуссию о машинах включился также М. Ниман. Он издал брошюру⁷⁴, в которой выступил с рядом возражений против идей, высказанных Рело. Он поддержал некоторые возражения Риттерсхауса и Бека, но выдвинул и собственные. Он считал, в частности, что кинематику следует определять как «...учение о взаимном движении поверхностей, исключаящем их взаимопроникновение». Определение, сводящее содержание кинематики только к учению о механизмах, оправдано ее историческим разви-

⁷² Th. Beck. Über den Begriff «Maschine», S. 416.

⁷³ F. Reuleaux. Über die Definition der Maschine. Als Beantwortung der Bemerkung des Hn Th. Beck.—«*Civilingenieur*», 1878, Bd. XXIV, S. 563.

⁷⁴ M. Niemann. Erläuterungen und Zusätze zu F. Reuleaux's Kinematik. Berlin, 1877.

тием, что, однако, не увеличивает его достоинств. Возражая Рело по поводу его определения машины, Ниман утверждает, что сущность машины заключается в передаче силы, поэтому наличие приемника и орудия в каждой машине является обязательным: они служат для восприятия и использования силы.

Не особенно благоприятной была и реакция французских кинематиков, на которых обрушился Рело на первых страницах своей книги. Так, Лабуле в третьем издании своего трактата по кинематике утверждает, что критика Рело не серьезна, поскольку он смешивает вопросы геометрии с вопросами практического конструирования. А кроме того, Рело, возражая против выдвинутых им (т. е. Лабуле) принципов, сам пользуется ими же. Это касается, в частности, и теории пар⁷⁵.

Дискуссия выяснила, с одной стороны, необходимость создания системы теории механизмов, с другой — то, что расчетной, математической теории Рело создать не смог. В упомянутом 3-м издании своего трактата Лабуле не только многократно ссылается на Чебышева, но и помещает в приложении весьма подробное изложение его идей, сделанное Двельсхаверс-Дери. Вслед за английскими кинематиками немецкие ученые начинают заниматься теорией математических приборов. В ряде статей Риттерсхаус рассматривает теорию эллипсографов, теорию параллелограмма Уатта (1877), кинематическо-геометрическую теорию ускорений (1878) и ряд других вопросов. Начинается интенсивная разработка графических и графоаналитических методов определения основных кинематических параметров и геометрических методов кинематики, в первую очередь кинематической геометрии. В сущности геометрическое направление явилось основой для создания научной школы в области кинематики, влияние которой чувствуется до настоящего времени.

Начинают усиливаться и центробежные тенденции. Оказалось, что в науки с одним и тем же названием — практическая механика, прикладная механика, теория механизмов, техническая механика и пр. — различные ученые вкладывают свое содержание. Рело назвал свой трактат не теорией механизмов, а теоретической кинематикой, хотя

к этому времени часть теоретической механики — теоретическая кинематика уже имела собственное содержание, отнюдь не совпадающее с теорией механизмов. Рело сам заметил нелогичность этого и предложил разделить науку о машинах на четыре ветви, узаконив тем самым происходящее расслоение в исследовательских направлениях. Предложение это оказалось жизненным, и только теория механизмов и теория машин в начале XX в. опять слились в одну науку, так как оказалось, что у них обеих один и тот же предмет исследования и аналогичные исследовательские методы.

Одновременно уточнялось содержание отдельных наук. Ведь даже само понятие «кинематика» оказалось двусмысленным: то, что понимал Рело под названием теоретической кинематики, отнюдь не соответствовало тому, что исследовал Резаль в «Трактате чистой кинематики». Грюблер поясняет такое положение тем, что Ампер, давая новой науке о движении название, в сущности объединил под ним две науки: кинематическую геометрию, т. е. геометрическое учение о движении, и учение о механизмах. А так как ученые работали в какой-то одной области, то они и развивали то или иное направление, в результате чего появилась тенденция к разделению кинематики на две части: теоретическую и прикладную. «Последнее не только противоречит определению этой науки Ампером, но и не является ни необходимым, ни полезным. Нетрудно доказать, что требования, предъявленные Ампером науке, названной им кинематикой, имеют свое внутреннее оправдание и что только тогда, когда кинематика удовлетворяет этим требованиям, она в состоянии действительно удовлетворить уже давно возникшую потребность в полной теории механизмов»⁷⁶.

Действительно, к тому времени вместо единой, «амперовой» кинематики появилось несколько наук, теоретических, прикладных и технических, которые Ампером предусмотрены не были, и среди них три чисто «кинематические»: теория механизмов, теоретическая, или чистая, кинематика и кинематическая геометрия (не говоря уже о побочных направлениях вроде теории инверсоров и про-

⁷⁵ Ch. Laboulaye. *Traité de cinématique théorique et pratique ou théorie des mécanismes*, 3-me ed. Paris, 1878, p. XXII.

⁷⁶ M. Grübler. *Wandlungen der Kinematik in der Gegenwart*. — «*Civilingenieur*», 1889, Bd. XXXV, S. 219.

чих математических приборов, которые с трудом умещались в тесные рамки этих наук).

Развитие механики машин в конце XIX в. характеризуется также взаимопроникновением наук, что в итоге приводит к созданию кинематики механизмов как части теории механизмов и машин. Действительно, первоначальное развитие механизмов было основано на описательных и совсем в ничтожной степени аналитических методах, которые могли дать нужное решение только в отдельных наиболее простых случаях — самое небольшое усложнение задачи приводило к непреодолимым трудностям. А геометрическое учение о движении было недостаточно развито, чтобы служить методом для теории механизмов. Помогло взаимопроникновение наук: задачи, поставленные теорией механизмов, стимулировали развитие методов кинематической геометрии, которые в свою очередь обеспечили решение задач механики машин. Большую роль в этом сыграло учение Рело о кинематических цепях, которое явилось методологической предпосылкой слияния теории механизмов и кинематической геометрии, так как дало возможность представить механизм в виде некоторой геометрической фигуры с подвижными сторонами — звеньями. Правда, и в первой половине века были случаи применения геометрии к решению задач кинематики, например в трудах Виллиса и Оливье, но относились они лишь к конкретным задачам теории зацеплений и не могли обеспечить создание общих расчетных методов науки. А это было необходимо, так как наука о машинах оставалась теорией машиностроения лишь на словах.

Значительный вклад в науку о машинах внес Грасгоф. Франц Грасгоф (Franz Grashof) родился в 1826 г. в Дюссельдорфе. Техник по призванию, он с 15 лет пошел работать в мастерскую учеником слесари. После нескольких лет работы поступил в Берлинский ремесленный институт, где учился до 1847 г. Затем он служил в торговом флоте матросом и относительно поздно приступил к научной деятельности. С 1854 г. Грасгоф преподавал в Берлинском ремесленном институте, занимаясь в основном прикладной механикой. В 1856 г. вместе с 23 молодыми инженерами, выпускниками института, организовал Союз немецких инженеров (VDI). Он также создал «Zeitschrift des VDI» — один из наиболее авторитетных технических журналов мира.

После смерти Редтенбахера Грасгоф был избран на его кафедру в Карлсруэ (1863). Умер Грасгоф в 1893 г.

Грасгоф был хорошим, но несколько сухим преподавателем. На лекциях никогда не ошибался в вычислениях, читал ясно и отчетливо. Любил заниматься с небольшой группой избранных учеников. В прикладной механике был теоретиком аналитического «толка» — редко пользовался чертежами.

Грасгофу принадлежит 42 работы, посвященные прикладной механике, гидравлике и теплотехнике и напечатанные главным образом в «Zeitschrift des VDI». Над своим основным трудом — «Теоретическим машиностроением» — он работал 20 лет, с 1870 по 1890 г. Задумал он его в четырех томах, но написал только три тома (четвертый том он предполагал посвятить рабочим машинам).

Первый том «Теоретического машиностроения» вышел в свет 1875 г. Содержанием его является механическая теория тепла, теплотехника и гидравлика. Значительно позже, в 1883 г., вышел второй том, собственно и заключающий в себе науку о машинах, причем не только кинематику, но и основы динамики машин.

Исследование кинематики механизмов Грасгоф начинает с теории кинематических пар. Для их определения он пользуется понятием степеней свободы (чего не делал Рело). Указав, что пары полностью определяются своей формой и характером соприкосновения элементов, он делит их на пары тройкой, двойкой и одинарной подвижности. Последние и являются элементарными парами принужденного движения по Рело. «Так как каждое элементарное движение, т. е. бесконечно малое движение твердого тела в пространстве, может быть разложено на три переноса вдоль трех пересекающихся и не лежащих в одной плоскости осей и на три вращения вокруг последних и поскольку эти шесть простых элементарных движений при свободно движущемся теле независимы между собой, им можно с помощью выражения, примененного В. Томсоном, приписать шесть степеней свободы; если тело имеет ограниченную подвижность, то в соответствии с видом ограничений, наложенных на его движение, только некоторые возможные движения остаются независимыми между собой»⁷⁷. В определении механизма Грасгоф следует Рело:

⁷⁷ F. Grashof. Theoretische Maschinenlehre, Bd. II. Berlin, 1883, S. 3.

«Механизм есть принужденная замкнутая кинематическая цепь, одно из сочленений которой остановлено; сколько членов имеет цепь, столько механизмов можно получить из нее, причем эти механизмы вообще будут различными... Механизм называется приводом (Getriebe), если одно из его подвижных звеньев принято в качестве начального звена, т. е. такого, какое непосредственно приводит механизм в движение в определенном смысле»⁷⁸. Наконец, Грасгоф определяет понятие машины, указывая, что машина является механизмом, предназначенным для выполнения определенной механической работы. Она состоит или из одного механизма, или из нескольких элементарных механизмов-приводов.

После теории пар Грасгоф излагает теорию центроид и аксидов, которой пользуется при построении теории высших пар. При этом профилирование зубчатых колес он также увязывает с теорией пар.

Гибкие и жидкие звенья Грасгоф рассматривает как составляющие «несамостоятельных» элементарных пар; они входят в состав «несамостоятельных кинематических цепей», которые обычно имеют силовое или цепное (ketenschlüssige) замыкание. К этой группе относится, например, цепь, образованная шкивами и ремнем, цепь, состоящая из сосуда, наполненного жидкостью, и поршней, и т. п.

Исследование механизмов Грасгоф начинает с простейших механизмов, соединенных низшими парами. При рассмотрении плоских шарнирных цепей он выводит теорему о шарнирном четырехзвеннике: «Четырехзвенная цепь, состоящая из вращающихся звеньев, может лишь тогда образовать кривошипно-коромысловый или двухкривошипный механизм, когда сумма наибольшего и наименьшего звеньев меньше суммы двух других звеньев. При закреплении наименьшего звена механизм будет двухкривошипным, а при закреплении одного из соседних с ним звеньев — кривошипно-коромысловым (причем наименьшее звено будет кривошипом); во всех других случаях из цепи получаются двухкоромысловые механизмы»⁷⁹.

Исследование пространственных цепей Грасгоф начинает со сферических механизмов с вращательными парами. Он указывает, что для достижения относительной подвиж-

ности конечной величины необходимо, чтобы такой механизм был по крайней мере четырехзвенной цепью. Далее он рассматривает общий случай движения в пространстве, когда простая замкнутая цепь принужденного движения (шарнирная) должна состоять из семи звеньев. Исследуя другие случаи простых замкнутых шарнирных цепей, он приходит к следующему заключению: «Простая замкнутая цепь тел вращения, если все их оси лежат в конечном пространстве, а сами они хотя бы частично не преобразовались в призматические пары, может иметь подвижность конечной величины лишь при 4, 6 или 7 звеньях: при 4 звеньях, если все оси пар пересекаются в одной точке (откуда следует, что их параллельность является лишь частным случаем); при 6 звеньях, если три последовательные оси пар пересекаются в одной точке, а три — в другой; при 7 — в любом ином случае»⁸⁰. При частичной замене шарниров призматическими парами минимальное число звеньев цепи может еще уменьшиться.

Теории сложных и составных механизмов Грасгоф уделяет относительно меньше внимания, так как считает, что решение задач кинематики возможно лишь при детальном изучении простых механизмов.

Динамика в сочинении Грасгофа представлена двумя разделами, посвященными теории трения и теории регуляторов. В последнем разделе он рассматривает тормоза, маховики, механические аккумуляторы и регуляторы двигателей.

Во втором томе изложена также теория механических измерительных приборов, в третьем — теория двигателей.

Сочинение Грасгофа явилось дальнейшим развитием теорий Рело и страдало теми же недостатками: отсутствием расчетных методов и описательным характером изложения. Правда, Грасгоф, в отличие от Рело, доказывает свои положения, но такие важные разделы кинематики, как теория кулачковых механизмов и теория зубчатых зацеплений, у него оказались только набросками: для них нужны были геометрические методы исследования, а Грасгоф не любил и избегал их, хотя в это время они уже интенсивно развивались.

Работа Грасгофа оказала значительное влияние на дальнейшее развитие механики машин. Любопытно, что на

⁷⁸ F. Grashof. Theoretische Maschinenlehre, Bd. II, S. 7.

⁷⁹ Там же, S. 117.

⁸⁰ Там же, с. 163.

протяжении пяти следующих лет вышли еще две книги, сыгравшие важную роль в истории этой науки: в 1886 г. — «Механика машин» А. Кеннеди, в 1888 г. — «Учебник кинематики» Бурместера. Направленность всех трех работ была различной, но, взаимно дополняя друг друга, они составили прочный фундамент и уже никто не сомневался «в праве на жизнь» учения о машинах.

Сэр Александр Блэки Вильям Кеннеди родился в 1847 г. После нескольких лет учебы в городской и горной школах в Лондоне он поступил учеником к морскому инженеру. Принимал участие в конструировании первой морской компаунд-машины. В 1868 г. работал в фирме Палмер чертежником, затем несколько лет учился в университетах Эдинбурга и Глазго, а с 1874 г. начал преподавательскую деятельность в Лондонском университетском колледже в качестве профессора инженерного дела и механической технологии. С 1875 г. читал механику машин, причем руководствовался лекциями и работами Рело, трактат которого перевел на английский язык и издал в 1877 г. В 1887 г. был избран членом Королевского общества. С 1889 г. возвратился на практическую работу и занимался строительством электростанций. В годы первой мировой войны руководил комитетом по созданию орудийных прицелов. Умер в 1928 г.

«Механика машин» Кеннеди явилась в сущности первым учебником в этой области на английском языке, написанном на совершенно новых основаниях. Кеннеди использовал идеи Рело, но дополнил их собственными исследованиями в области кинематики, кинематической геометрии и графических методов и создал руководство, отличавшееся высокими научными достоинствами и в то же время написанное с большим дидактическим тактом. Эту книгу не без пользы можно читать и в наши дни.

В книге изложена известная теорема о трех мгновенных центрах вращения, найденная независимо Кеннеди и Аронгольдом и поэтому известная под названием теоремы Аронгольда — Кеннеди. Кеннеди применяет ее для нахождения мгновенных центров вращения, которые нужны ему для определения скоростей исследуемых точек механизмов. Ускорения в этих точках он определяет с помощью графического дифференцирования. Своему методу Кеннеди уделяет значительную часть книги (гл. I—VI), считая, что он может привести к очень интересным результатам и соста-

вить основу графоаналитического исследования механизмов.

Далее Кеннеди исследует кривоые скоростей и ускорений для некоторой точки механизма и для определенного периода времени и излагает метод графического дифференцирования и интегрирования. Особенно тщательно он разбирает вопрос определения масштабов.

Некоторая неясность осталась у Кеннеди в вопросе определения машины. С одной стороны, он доказывает, что машина состоит не из одного тела, а минимально из двух, и в качестве примера приводит «простые машины»⁸¹. Но несколько далее, после введения понятия о парах, он определяет механизм как замкнутую кинематическую цепь с одним закрепленным звеном и указывает, что механизм является идеальной формой машины. Возвращаясь к «простым машинам», он говорит, что они представляют собой не машины, а кинематические пары⁸².

Очень тщательно и подробно разбирает Кеннеди вопрос о трении в машинах (последняя глава). Хорошо и достаточно полно написан раздел об инверсорах.

Кеннеди не пользуется планами скоростей и ускорений, методом, разработкой которого занимались Р. Прелль, О. Мор и Бурместер в Германии и Р. Смит в Англии. По-видимому, идея или во всяком случае, первое высказывание о возможности такого метода принадлежало Преллю. Затем Мор в ряде статей в «*Civilingenieur*» на протяжении



Р. Смит

⁸¹ A. B. Kennedy. The Mechanism of Machinery. London, 1886, p. 2—3.

⁸² Там же, с. 66. В примечании к стр. 391 Кеннеди пишет: «Весьма печально, что изучение этих «простых машин» до сих пор санкционируется и поощряется правилами экзаменов Лондонского университета, которые имеют такое важное влияние на постановку преподавания соответствующих предметов».

1879—1887 гг. опубликовал свои исследования в этом направлении. К 1878—1880 гг. относится серия статей Бурместера. Р. Смит изложил основы метода графического определения скоростей и ускорений шарнирных механизмов в сообщении, опубликованном в 1885 г. Метод планов скоростей и ускорений изложен им весьма тщательно и подробно, поэтому трудно судить о приоритете. По-видимому, Смит пришел к методу независимо от Мора и Бурместера, однако и Мор, и Бурместер, очевидно, знали о работах Прелля. Во всяком случае, Р. Смит⁸³ приложил большие усилия, чтобы обобщить и распространить этот метод. Кстати сказать, он считал, что предложенный Кеннеди метод графического дифференцирования (на который тот возлагал большие надежды) совершенно бесполезен для практического применения.

Отто Мор является одной из ведущих фигур в прикладной механике (в самом широком смысле этого понятия). Его имя можно встретить и в механике машин, и в строительной механике, и в сопротивлении материалов. 16 лет он поступил в Ганноверскую политехническую школу, по окончании которой перешел на практическую работу и десять лет работал инженером-строителем. В 1867 г. он получил кафедру механики в Штутгартском политехникуме. С 1873 г., после смерти Цейнера, читал в Дрезденском политехникуме механику и теорию упругости. В последние годы жизни Мор отошел от педагогической работы, посвятив себя исключительно научной деятельности. Он был одним из первых докторов *honoris causa*. Его учениками были Карл Бах и Август Фёппль. Его работы, как и его лекции, отличались исчерпывающей ясностью: каждый исследуемый вопрос он рассматривает в историческом плане, давая подробные ссылки на литературу.

Новым направлением в кинематике механизмов стало учение о структуре. Начал его, как мы видели, Чебышев, и в течение последней четверти века оно привлекало к себе

⁸³ Роберт Генри Смит (Robert Henry Smith, 1852—1916) — профессор Императорского университета в Японии, позже профессор инженерного дела в Мэзон-колледже Бирмингемского университета. Его работы в области графоаналитических методов расчета: *A New Graphic Analysis of the Kinematics of Mechanism*. — «Transactions of the Royal Society of Edinburgh», 1882—1885, v. 32, p. 507; *Graphics of the art of Calculating by Drawing Lines*. — *Ibidem*, 1889, p. 144—162.

внимание многих математиков, обнаруживших, что оно является путем к установлению научной классификации механизмов, в которой уже чувствовалась необходимость, поскольку количество механизмов быстро увеличивалось.

В 1874 г. этот вопрос исследовал Сильвестер, несколько позже О. Мор и М. Леви⁸⁴ — для цепей с нулевой степенью подвижности.

Подвижность простейших шарнирных пространственных цепей впервые исследовал Т. Риттерсхаус в ряде статей, опубликованных в «*Civilingenieur*» в 1875 и 1876 гг.⁸⁵

В 1883 г. Грюблер⁸⁶ опубликовал в «*Civilingenieur*» статью под названием «Общие свойства плоских кинематических цепей принужденного движения»⁸⁷, в которой вывел формулу, носившую его имя, пока не было доказано, что она принадлежит Чебышеву. Впрочем, сам Грюблер делает в статье ссылку на Чебышева.

В обозначениях Грюблера формула имеет вид

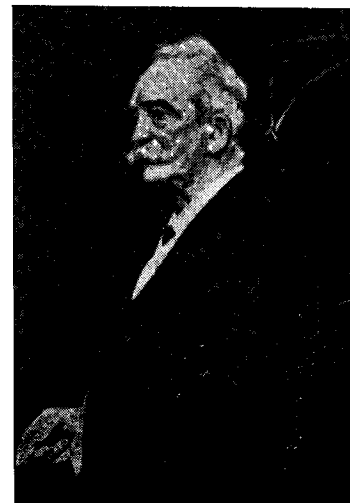
$$2g - 3n + 4 = 0,$$

⁸⁴ Морис Леви (Maurice Lévy, 1838—1910) — математик и инженер. Профессор Центральной школы (1875), Коллеж де Франс (1880). Работы в области механики, графической статистики, гидродинамики, теории упругости. Член Парижской академии наук (1883).

⁸⁵ «*Civilingenieur*», 1875, Bd. XXI, S. 443; 1876, Bd. XXII, S. 559.

⁸⁶ Мартин Грюблер (Martin Fürchtegott Grubler, 1851—1935). Учился в Лейпциге и Дрездене в 1870—1880 гг. Приват-доцент по кафедре прикладной механики в Цюрихе и Дрездене. Профессор Рижского политехнического института (1886—1896), Берлинской высшей технической школы (1896—1900), Дрезденской высшей технической школы (1900—1921).

⁸⁷ М. Grubler. Allgemeine Eigenschaften der zwangläufigen ebenen kinematischen Ketten. — «*Civilingenieur*», 1883, Bd. XXIX, S. 167—200.



О. Мор



М. Грюблер

где g — число всех шарниров, n — число всех звеньев механизма. Формула определяет существование механизма с одной степенью свободы.

Работы по теории структуры принадлежат также И. Таубелесу и П. О. Сомову.

Ряд вопросов кинематической геометрии, в частности теории плоской подобно-изменяемой системы, разработал Р. Мемке⁸⁸. Ему принадлежат теоремы об ускорениях высших степеней и о подобии планов ускорений высших степеней и схем механизмов.

Над вопросами кинематики механизмов работали Т. Риттерсхаус, В. Шелль,

И. Шадвилл, И. Таубелес и другие ученые. К концу 80-х годов накопился значительный материал в области как кинематики механизмов, так и кинематической геометрии. Систематизацию этого материала выполнил немецкий геометр Л. Бурместер.

Людвиг Бурместер (Ludwig Burmester) родился в 1840 г. в семье садовника. 14 лет поступил в ученики к часовщику, затем работал подмастерьем механика и одновременно учился в вечерней ремесленной школе. В 1862 г. поступил в Дрезденский политехникум на отделение подготовки учителей средней школы, по окончании которого изучал математику в Гёттингенском и Гейдельбергском университетах. В 1866 г. получил место преподавателя физики и начертательной геометрии в Лодзинском реальном училище. С 1872 г. Бурместер читал аналити-

ческую и кинематическую геометрию в Дрезденском политехникуме. Здесь же он написал свой знаменитый «Учебник кинематики». С 1887 г. Бурместер читал лекции по начертательной геометрии и кинематике в Мюнхенской высшей технической школе. В 1905 г. был избран действительным членом Баварской академии наук. Последние годы жизни Бурместер посвятил исключительно научной работе — вопросам кинематики. Умер он в 1927 г.

Исследования Бурместера в области кинематики относились к теории подобно-изменяемых и аффинно-изменяемых плоских систем (1874), теории движения плоских и пространственных систем (1878—1879), теории проектно-изменяемых и бифокально-изменяемых систем (1880). К этим вопросам он возвращается постоянно, исследует распределение скоростей и ускорений систем, их кинематические свойства.

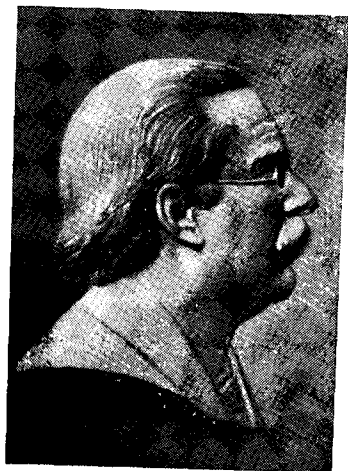
«Учебник кинематики» посвящен исследованию плоского движения, и в этом отношении он явился трактатом, где с исчерпывающей полнотой рассмотрены вопросы прикладной кинематики и кинематической геометрии. К книге приложен атлас из 863 чертежей, выполненных автором.

В первом разделе книги Бурместер дает сводку основных понятий плоского движения. Раздел начинается определением скорости для равномерного и неравномерного движений и ее геометрическим изображением: графические методы, применяемые Бурместером, несколько отличаются от построений Прелля, Мора и Смита. Затем следуют общие определения движения плоской системы: понятия мгновенного полюса вращения, подвижной и неподвижной centroид, огибаемой и огибающей; здесь автор пользуется методом обращения движения.

Далее Бурместер рассматривает некоторые специальные случаи плоского движения: эллиптическое и кардиоидное движение, построение конхоиды и эвольвенты, построение эквидистантных кривых. Затем он исследует вопросы, связанные с теоремой о трех полюсах вращения, построение скоростей, а также касательных и нормалей к кривым, использование этих построений в разных практических случаях теорий механизмов, дает обобщение теоремы Бобилье, исследует построение кругов Лагира.

Второй раздел, посвященный теории циклических кривых, является небольшим самостоятельным монографи-

⁸⁸ Рудольф Мемке (Rudolf Mehmke, 1857—1944). Учился архитектуре в Штутгарте, затем математике в Тюбингене и Берлине. В 1844—1894 гг. преподавал механику в Дармштадтском университете, а в 1894—1922 гг. занимал должность профессора Штутгартского высшего технического училища. Инженер-доктор (1917). Сконструировал ряд приборов для численного решения уравнений. Ряд работ по кинематике механизмов.



Л. Бурместер

ческим исследованием, слабо связанным с дальнейшим содержанием книги.

Третий раздел представляет собой весьма обстоятельное исследование геометрии зубчатых зацеплений. Автор рассматривает здесь как циклоидальные, так и эвольвентные профили зубчатых колес.

Четвертый раздел, посвященный специальному случаю теории шестеренных насосов, является в определенной степени развитием и примером практического применения геометрической теории зубчатых зацеплений. Включен он в трактат, очевидно, не без оглядки на кни-

гу Рело, который впервые отвел этим насосам значительное место в своей «Кинематике».

Разделы пятый, шестой и седьмой заключают в себе основное содержание теории механизмов. Бурместер вводит понятие принужденного движения и излагает теорию пар по Рело, слегка изменяя терминологию. Так, он считает излишним понятие кинематической цепи и заменяет его понятием механизма; вводит понятие механизма принужденного движения (*zwangläufiger Mechanismus*); механизм с одним закрепленным звеном он называет приводом.

Некоторую терминологическую неясность он допускает при рассмотрении замены высшей пары низшими, что приводит его к ошибочному положению. «Двухзвенный механизм с высшей парой» он заменяет шарнирным четырехзвенником, причем указывает, что «высшая пара заменяется четырьмя низшими элементарными парами», что, конечно, неверно. Далее, вводя понятия элементарного механизма (состоящего из двух звеньев и одной пары) и простого механизма, представляющего собой замкнутый ряд (*Reihenfolge*), он избегает выражения «кинематическая цепь», причем каждое звено у него связано лишь с двумя другими звеньями.

Всякий иной механизм Бурместер называет составным.

Простые плоские механизмы служат темой шестого раздела. Очень подробно рассмотрен шарнирный четырехзвенник во всех его разновидностях. Тут же исследована теорема Грасгофа, шатунные кривые (приводится теорема Роберта) и их формы. При рассмотрении графического способа построения скоростей механизма (плана скоростей), Бурместер использует мгновенные центры вращения, а также поворот скорости на 90° и совмещение ее по направлению с кривошипом. Разновидности простого четырехзвенного механизма Бурместер распределяет на четыре группы: кривошипно-шатунные механизмы; механизмы с двумя поступательными и двумя вращательными парами с расположением по соседству однотипных пар; механизмы того же вида, но с крестообразным расположением однотипных пар; механизмы с тремя поступательными парами. Приводится графический метод построения скоростей для этих механизмов. Подобным образом Бурместер рассматривает и другие группы простых механизмов: механизмы с соприкосновением по кривой (колеса, кулачки, эксцентрики), с гибкой передачей, замыкающие и тормозные.

В седьмом разделе Бурместер исследует структуру и кинематику составных плоских механизмов. Он предлагает следующую «естественную» их классификацию.

1. Шарнирные механизмы, включающие только вращательные пары.
2. Направляющие механизмы, имеющие только поступательные пары.
3. Двухзвенные механизмы, имеющие только высшие пары.
4. Смешанные механизмы, включающие пары различных типов.

Однако такая классификация ничего не может дать для практики, и поэтому он выделяет группы: типичные шарнирные механизмы, колесные механизмы, механизмы с гибкими звеньями. Структурный анализ механизмов Бурместер проводит, определяя принужденность их движения; при этом он определяет также соотношения между числом звеньев механизма и числом полюсов.

Достаточно подробно Бурместер исследует зубчатые механизмы и различные соединения зубчатых колес, включая эпициклические механизмы. Исходя из отноше-

ния угловых скоростей он вводит понятие передаточного отношения и условного правила знаков.

В восьмом разделе рассмотрены инверсоры, механизмы для выполнения движения по заданному закону и механизмы принужденного движения с двумя и тремя ведущими звеньями.

Девятый раздел посвящен теории механизмов для приближенного воспроизведения прямой линии. В нем рассматриваются также геометрические условия приближения в четырех, пяти и шести точках. Этот раздел представляет большой интерес, поскольку в нем изложены идеи и методы, которые впоследствии определили создание геометрического синтеза механизмов «по Бурместеру». Едва ли самому Бурместеру были ясны тогда возможности этих мощных методов; он лишь разрабатывал новые вопросы кинематической геометрии, исследуя свойства семейств таких шатунных кривых, которые на некотором участке совпадают в четырех, пяти или шести точках с прямой. Следовательно, соответствующие механизмы можно было бы использовать в качестве приближенных инверсоров. Он нашел две важные кривые: кривую круговых точек и кривую центров. Кривая круговых точек является геометрическим местом точек некоторой фигуры, четыре положения которых лежат на одной окружности; кривая центров — геометрическое место центров этих окружностей. Бурместер указывает на сложность аналитического метода Чебышева, он сам не дает оценки точности совпадения участка шатунной кривой с прямой линией.

В десятом разделе трактата исследуются золотниковые распределительные механизмы. Раздел этот с точки зрения собственно кинематики не представляет особенного интереса, так как не содержит ничего нового.

Одиннадцатый раздел посвящен изложению учения об ускорении и его применению в теории механизмов. Интересно, что Бурместер не рассматривает ускорение вместе с другими кинематическими параметрами, а выделяет его в отдельный раздел. Возможно, он хотел в дальнейшем написать отдельный раздел о силовых воздействиях на механизм и мыслил раздел об ускорениях как переходный от чисто кинематического исследования к динамическому. После изложения общих кинематических соображений, в том числе теоремы Кориолиса, Бурместер пере-

ходит к определению ускорений в составном движении. Он приводит геометрическое построение и ряд интересных примеров, рассматривает вопрос об ускорениях высших порядков (по О. И. Сомову).

В последнем, двенадцатом, разделе Бурместер излагает теорию закономерно изменяемых плоских систем, особенно подобно-изменяемых, аффино-изменяемых и бифокально-изменяемых; здесь он пользуется собственными исследованиями, выполненными в этом направлении.

Книга Бурместера написана легко, в ней много примеров и ссылок на литературные источники. Она является первым трудом, в котором геометрическое учение о движении и теория механизмов гармонически слиты в одну науку. Бурместер хотел написать второй том «Учебника кинематики», посвященный пространственному движению, но это оказалось свыше его сил: задача геометрии пространственного движения, за исключением нескольких частных случаев, в конце XIX в. была еще совсем не разработана. К тому же и число пространственных механизмов, которые применяла техника того времени, было ничтожным.

В последней четверти XIX в. механика машин начинает изучаться в высших технических школах США. Бурное развитие североамериканской промышленности и возросшая в связи с этим потребность в технических кадрах повлекли за собой развитие всей системы технического образования. Но на истории американской технической школы отразились характерные особенности американской промышленности. Политехнические и специальные школы во Франции, как и подобные высшие школы в других странах (например, Петербургский институт инженеров путей сообщения), готовили инженеров для государственной службы. В какой-то степени тем же занималась Вест-Пойнтская военная академия. Но большинство политехнических и технологических школ США готовило инженеров для частной промышленности, при этом диплом зачастую терял свое значение, так как с ним не связывалось каких-либо преимуществ. Методика подобной подготовки требовала сообщения обучаемому некоторой суммы знаний, главным образом стандартных, необходимых для практической деятельности, а это отнюдь не способствовало развитию научного уровня преподавания. Таким образом, получился разрыв между преподаванием-инструктажем и наукой, оказавшейся на втором плане. Поэтому наука

в США в последней четверти века, в частности механика машин, занимает относительно скромное место.

Интересно, что в США нашли широкое применение таблицы «элементарных машин» Ланца и Бетанкура и Ашетта⁸⁹. Л. С. Фергюсон прослеживает историю их появления в американской технической литературе на протяжении почти полутора столетий. «Scientific American», который начал выходить в 1845 г. в качестве патентного журнала, почти с первых номеров публиковал раздел о механизмах. «American Artisan» начал публиковать подобную серию в 1864 г., а в 1868 г. издал компиляцию этой серии под названием «Пятьсот семь механических движений»⁹⁰. Такая узкопрактическая тенденция американской технической литературы очень характерна для рассматриваемого периода. В конце века в США начали проникать идеи Рело и других ученых-машинистов, но воспринимались они пассивно.

В последней четверти века значительное распространение в американских технических школах получили учебники по теории механизмов Виллиса и Ранкина. Одним из первых американских учебников была книга Мак Корда «Кинематика»⁹¹. В течение 80—90-х годов было издано еще несколько малооригинальных учебников, написанных преподавателями технических школ и отличавшихся друг от друга лишь курсом, положенным в их основу. В 1886 г. появилась книга Кеннеди и была принята в ряде школ в качестве учебника. Почти одновременно профессор машиностроительного конструирования Массачусетского технологического института Питер Швамб начал издавать заметки по кинематике, основанные на работах Рело и Ранкина. В 1904 г. он составил из этих заметок учебник,

выдержавший до 1947 г. шесть изданий. Как и другие американские учебники по технической кинематике конца XIX — начала XX в., он очень элементарен и по своему теоретическому уровню стоит намного ниже русских и западноевропейских учебников.

Таким образом, к началу XX в. техническая кинематика трудами французских, русских, немецких и английских ученых сформировалась в самостоятельное научное направление. Были разработаны графические, графоаналитические и аналитические вычислительные и расчетные методы, созданы кинематическая геометрия и теоретическая кинематика как самостоятельные разделы аналитической механики. Но тогда же выявились и существенные затруднения: отсутствие научной классификации не давало возможности применить разработанные расчетные методы на практике.

Во второй половине века определенный вклад в создание науки о машинах вносят также швейцарские, голландские, бельгийские, австрийские, итальянские, польские, чешские ученые. Начинается становление прикладной механики в Швеции и Японии; вместе с развитием машинного производства и индустриализацией промышленности, развитием высшего технического образования развивается и механика машин как основная наука машиностроительного цикла.

⁸⁹ В 1816 г. С. Трейер привез книгу Ашетта в США; по-видимому, с 1824 г. она служила учебником в Вест-Пойнте; книга Ланца и Бетанкура была переведена на английский язык в 1820 г. (Analytical Essay on the construction of Machines. London, 1820). Таблицы были перепечатаны в кн.: Thomas Fenwick Essays on Practical Mechanics. Durham, 1822, а также с небольшими изменениями в кн.: Appleton's Dictionary of Machines, Mechanics, Engine-Work and Engineering, 2 vls. N. Y., 1851.

⁹⁰ Ferguson. Kinematics of Mechanisms from the Time of Watt, p. 218.

⁹¹ Чарльз Мак Корд (Charles Mac Cord, 1836—1915) — профессор механического черчения Технологического института Стенсона в Хобокене.

РАЗВИТИЕ МЕХАНИКИ МАШИН
В РОССИИ

Промышленный подъем в России начался вскоре после реформы 1861 г.; к 80-м годам промышленный переворот в основных отраслях хозяйства завершился, но темпы развития продолжали оставаться высокими: за 40 лет, с 1860 по 1900 г., производство промышленной продукции увеличилось в семь раз. Естественно, возросли требования к техническим наукам и к высшей технической школе, причем и в количественном и в качественном отношении. Небольшие выпуски нескольких русских высших технических школ не могли удовлетворить все возрастающие требования промышленности в квалифицированных технических кадрах. Встал вопрос о дальнейшем расширении сети технических учебных заведений.

Но этот процесс отнюдь не был гладким: правительство царской России не было заинтересовано ни в развитии наук, ни в развитии школы. На протяжении всего XIX столетия в дополнение к Дерптскому и Московскому были открыты университеты лишь в пяти городах: Казани, Харькове, Киеве, Петербурге и Одессе (Новороссийский университет). Для России этого было явно недостаточно; число технических школ также было крайне ограниченным и надежды на организацию новых не было. Поэтому в середине 70-х годов опять возникла мысль об организации при физико-математических факультетах университетов технических отделений: мысль, несомненно, заимствованная из английского опыта. Одним из инициаторов этого предложения был профессор Киевского университета И. И. Рахманинов¹. Он предложил ввести на физико-мате-

матических факультетах вместо существовавших двух четыре отделения: математических наук с приложением их к теоретическому изучению явлений природы, служащих предметом физики и астрономии; математических наук с приложением их к практической и строительной механике; естественноисторическое; химико-техническое. Свои доводы Рахманинов изложил в специальной записке.

П. Л. Чебышев считал, что технические факультеты можно организовать при университетах, но ни в коем случае нельзя сливать с математическими отделениями, так как цели и методы их различны. По его мнению, «в записке И. И. Рахманинова совсем не обращено внимания на разницу, которая существует между науками физико-математическими и знаниями техническими, которые представляют собой собрания сведений из разных наук, без всякой внутренней связи. Так, в учении о паровых машинах говорится о топливе, о тяге, о воде, о париках и пр. и пр. Столь разнородные предметы никоим образом не могут быть излагаемы в строго научной форме, в которой излагаются все предметы физико-математического факультета и которые так благотворно действуют на развитие умственной способности... Особенно поразительна разница в употреблении математики в науках математических и в вопросах технических: нестрогость выводов, которая ни под каким видом не допускается в науках математических и от которой так остерегаются все учащиеся им, — при решении вопросов технических является вещью весьма обыкновенною, и это происходит не от совершенства математических методов, а от самой сущности вопросов технических, вследствие этого преждевременное занятие науками техническими, требующими употребления математического анализа, противодействует образованию математического склада ума»².

Прикладная механика как наука о машинах продолжала оставаться одним из предметов университетского преподавания. Весьма примечательно, что едва ли не большинство русских ученых, работавших в области механики

¹ Иван Иванович Рахманинов (1826—1897). Учился в Московском университете у Н. Д. Брашмана. В 1853—1897 гг. работал в Киевском университете, сначала адъюнктом, затем профессором прикладной математики. Работа Рахманинова «Вертикальные во-

дяные колеса для малых падений» (1853) получила положительный отзыв П. Л. Чебышева.

² Журналы заседаний учрежденной 21 апреля 1875 года комиссии по пересмотру университетского устава. Спб., 1876 (журнал от 10 ноября 1876 г.).

машин, были выпускниками физико-математических факультетов, что, несомненно, определило и высокий научный уровень русской науки о машинах. Важнейшую роль в этом вопросе играл Московский университет, где по традиции, унаследованной от Н. Д. Брашмана, постановке преподавания прикладной механики уделялось всегда большое внимание. После А. С. Ершова кафедру прикладной механики в Московском университете и Московском высшем техническом училище получил Ф. Е. Орлов.

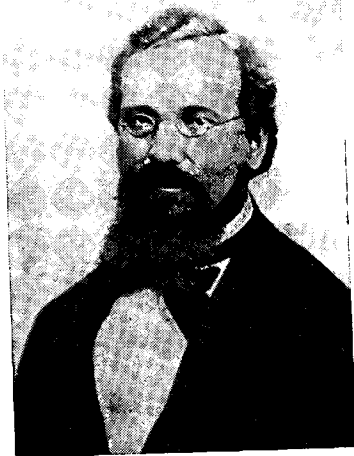
Федор Евплович Орлов родился в 1843 г. в селе Великом Новгородской губернии в семье военного врача. В 1859 г. по окончании Ярославской гимназии он поступил в Московский университет, где пользовался особым расположением Н. Д. Брашмана. В 1863 г. окончил университет и был оставлен при кафедре чистой математики «для подготовки к профессорскому званию», а в 1869 г. защитил магистерскую диссертацию.

После смерти А. С. Ершова кафедру временно занимал Д. Н. Лебедев. А. Ю. Давидов рекомендовал на эту кафедру Орлова. Прежде чем занять кафедру, Орлов получилграничную командировку для изучения прикладной механики. В сентябре 1869 г. он выехал в Швейцарию, предварительно получив в Петербурге советы и рекомендации П. Л. Чебышева и И. А. Вышнеградского. В Швейцарии, в Цюрихе, Орлов пробыл целый год. По совету Цейнера он слушал лекции по технической механике и построению машин на втором курсе и по теоретическому учению о машинах на третьем курсе Цюрихского политехникума. В следующем году он поехал в Берлин, где встретился с Рело. «Узнав, что я владею математическим образованием,— пишет Орлов,— и прослушал у Цейнера полный теоретический курс машин, он сказал, что было бы бесполезною тратой времени слушать еще профессора Грасмана, потому что он нейдет далее Цейнера в своих лекциях; что касается практического специального курса, то он указал на Вибе. Он спросил меня также, интересуюсь ли я кинематикой, которую он читает в Академии; в таком случае он советовал бы мне также слушать кинематическую геометрию у профессора Аронгольда — весьма интересные лекции. Хотя я уже прослушал курс построения составных машин в Цюрихе, но я выразил желание прослушать его еще раз у Рело, и он предложил мне без гонорара... посещать его чертежную. Затем он указал мне

на лекции Гроте («Geschichte der Technik»)³. В аудитории Рело Орлову особенно понравился стол для демонстрации опытов, «который назван кинематическим столом. В нем находятся прорезы и шипы для укрепления и передвижения механизмов, которые могут быть приведены в движение маленькою водостолбовою машиной»⁴.

Из Берлина Ф. Е. Орлов переехал в Льеж. В письме к директору Московского технического училища В. К. Делла-Восу Орлов дает интересную характеристику загранично-европейских технических школ:

«Сравнивая преподавание на механическом отделении здешней (льежской) школы с преподаванием в соответствующих отделениях немецких политехнических школ, можно заметить, что практическим работам дан здесь большой перевес, даже в ущерб научному образованию. Курсы прикладной механики и построения машин, годичные, и многие отделы обширных официальных программ могут быть изложены лишь поверхностно, тогда как на соответствующие курсы в Германии (Theoretische Maschinenlehre und Maschinenbau) употребляется два или три года, при более скромных программах. Кроме того, многие необходимые предметы, как, например, механическая технология, здесь вообще не читаются; зато на практические работы в мастерской полагается 16 обязательных часов в неделю. Немецкие политехнические школы давно уже отказались от мысли соединить оба эти направления, научное и практическое; так, например, мастерские, задуманные в обширных размерах при Берлинской академии, значительно сокращены с течением времени, вследствие



Ф. Е. Орлов

³ Ф. Е. Орлов. Дневник заграничной командировки 1869—1872 гг. М., 1898, с. 139.

⁴ Там же.

слабого участия студентов в практических работах, и служат теперь только для приготовления моделей; то же повторяется и в других школах. По мнению ученых специалистов, директоров школ, как Цейнер, Грасгоф, Рело, школа не может образовать готового практика и задача ее должна состоять только в научной подготовке к практической деятельности; по их мнению, школа должна стоять выше практических требований времени, освещать светом науки путь к усовершенствованию практики. Этим не отвергается, впрочем, необходимость практических занятий; напротив, признано по опыту (и я сам убедился в этом, глядя на занятия студентов), что студенты, бывшие на практике до вступления в школу, всегда могли легче и полнее воспользоваться научным материалом, который дает им школа. Поэтому знакомство с практическими приемами должно вообще предшествовать специальным занятиям»⁵.

Замечание Орлова о том, что студенты должны быть знакомы с производством до поступления в высшую школу, сделанное им на основании его наблюдений, неоднократно бралось на вооружение русской технической школы на протяжении ее многолетней истории.

После Льежа Ф. Е. Орлов переехал в Париж. Здесь он познакомился с выдающимися учеными, слушал лекции Гатона де ла Гуийера, Бресса, Шаля, Бертрана. Осенью 1872 г. он вернулся в Москву и приступил к преподаванию в университете и техническом училище. Вступительную лекцию в университете на тему «О машинах» он посвятил изложению кинематических теорий Рело. Н. Е. Жуковский, с которым Ф. Е. Орлов был в особенно дружеских отношениях, писал: «В Московском университете преподавание практической механики было поставлено Ф[едором] Е[вловичем] на ту высоту, на которой оно не стоит ни в одном из русских университетов. Я помню, как одобрително отозвался председатель экзаменационной комиссии В. Г. Имшенецкий, встретив в ответах студентов по специальным курсам практической механики такие обширные знания, которые можно было ожидать только от воспитанников специальных технических школ. Ф[едор] Е[влович] поощрял студентов заниматься его предметом. Он

устроил в университете прекрасный механический кабинет, завел классы черчения и проектирования. Он всегда охотно сообщал занимавшимся у него студентам сведения для писания кандидатских сочинений, наделяя их даже книгами из своей библиотеки. Можно сказать, что почти половина кандидатских сочинений писалась в университете по практической механике»⁶.

Личные работы Ф. Е. Орлова относились к теории механизмов и теории рулетт. Орлов был очень близок с Н. Е. Жуковским. Как указывает Л. С. Лейбензон⁷, он привлек Жуковского к исследованиям в области прикладной гидромеханики и теоретического машиностроения. Умер Ф. Е. Орлов в 1892 г.

Кроме университета Орлов читал практическую механику в техническом училище и Московской практической академии коммерческих наук. Он был первым профессором технического училища по кафедре прикладной механики и организатором его инженерно-механического отделения. Курсы Орлова были очень содержательными и отличались новизной изложения. Все определения были тщательно отработаны. Так, указав, что машину можно расчленить на приемник, орудие и собственно механизм, он поясняет далее: «Механизм, который служит для передачи движения, по устройству своему не зависит ни от двигателя, ни от работы, которая производится машиной; он должен удовлетворять только геометрическим условиям, для правильной передачи движения от одной части машины к другой.

Надо, впрочем, заметить, что в некоторых машинах нельзя строго различить три указанные части, например, трудно сказать, где приемник, где орудие в подъемной машине, иногда целая машина рассматривается как приемник, например водяное колесо или паровая машина... иногда бывает наоборот: машина рассматривается как орудие, например ткацкий станок и другие машины, служащие для обработки металлов и дерева.

Поэтому-то все машины разделяются на машины-двигатели (правильнее, приемники) и машины-орудия»⁸. Да-

⁵ Ф. Е. Орлов. Дневник заграничной командировки 1869—1872 гг., с. 274—275.

⁶ Н. Е. Жуковский. Некролог и очерк деятельности Ф. Е. Орлова как профессора Московского университета, с. 338.

⁷ Л. С. Лейбензон. Николай Егорович Жуковский. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947, с. 76.

⁸ Ф. Е. Орлов. Лекции прикладной механики. М., 1873—1874, с. 4.

лее Орлов делит машины-орудия на машины трансформирующие, служащие для изменения формы, и машины транспортирующие, служащие для изменения местоположения (подъемные машины, паровозы, пароходы, насосы, вентиляторы). Трансформирующие машины он делит на три вида: без отделения частиц обрабатываемых тел (прессы, молоты), с разделением частиц обрабатываемых тел (станки) и с соединением частиц различных тел (ткацкие, бумажные станки, печатные машины).

Интересно, что в 70-х годах или несколько позже кабинеты практической механики возникают буквально во всех русских университетах, а прикладная механика становится обязательным предметом преподавания на физико-математических факультетах. В Киевском университете преподавание прикладной механики началось значительно раньше, чуть не с первых лет существования университета, и связано было с унаследованным от Кременецкого лицея кабинетом практической механики. С 1838 г. этот курс в Киевском университете читал Н. А. Дьяченко⁹, а с 1853 г. — И. И. Рахманинов. Н. А. Дьяченко читал курс практической механики по программам, близким к программам П. Л. Чебышева, он читал элементарную теорию машин и курс построения машин. Рахманинов несколько расширил эти программы, главным образом раздел гидравлических машин.

Рахманинов заново создал кабинет машин и моделей при университете, так как старые модели устарели и единственной систематической коллекцией был набор механизмов для преобразования движений, сделанный киевскими механиками из тонких медных пластинок. Для кабинета были приобретены модели приемников (водяных колес различных систем, водостолбовой машины, ветряной мельницы), водоподъемных машин, вентиляторов, различных систем паровых машин, пароходов, локомотивов, газовых машин, электродвигателей, а также ряд приборов и деталей машин. В начале 80-х годов были приобретены кинематические модели, изготовленные в Берлине по системе Рело.

⁹ Никита Андреевич Дьяченко (1809—1877). Окончил Харьковский университет. В 1838 г. защитил докторскую диссертацию «О гидравлических колесах». Читал в Киевском университете ряд курсов по чистой и прикладной математике.

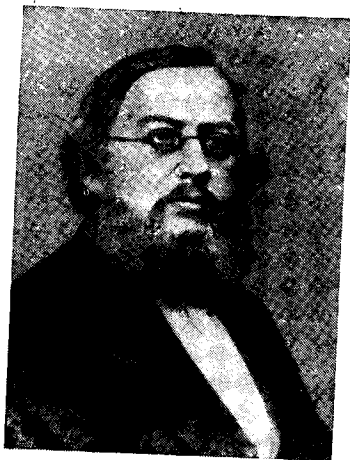
Своим ученикам Рахманинов рекомендовал кандидатские темы из области прикладной механики.

Примерно в те же годы был создан кабинет практической механики и в Харьковском университете, где также была богатая коллекция приборов по системе Рело. Кафедра механики в Харьковском университете была открыта в 1863 г. С 1872 по 1882 г. ею руководил В. Г. Имшенецкий, с 1882 по 1902 г. — А. М. Ляпунов, после него — В. А. Стеклов.

В Петербургском университете преподавание механики во второй половине века также связано с именами П. Л. Чебышева, О. И. Сомова и их учеников.

Осип Иванович Сомов (1815—1876) по окончании Московской губернской гимназии поступил на физико-математический факультет Московского университета, который окончил в 1835 г. В 1841 г. он был утвержден адъюнкт-профессором по кафедре чистой математики Петербургского университета. В 1846 г. защитил диссертацию на степень доктора прикладной математики. Читал он почти все курсы чистой математики, а с 1848 г. начал читать курс теоретической механики. В январе 1862 г. Сомов был избран ординарным академиком по кафедре чистой математики (вакансию эту занимал скончавшийся незадолго перед тем М. В. Остроградский), и дальнейшая его деятельность была связана с Академией наук, хотя он не оставил и преподавания в Петербургском университете. Кроме этого, О. И. Сомов свыше 10 лет преподавал в Институте корпуса горных инженеров и свыше 20 лет (1848—1869) — в Институте инженеров путей сообщения.

Выше упоминалось о «Трактате о чистой кинематике» Резаля — первом произведении, в котором теоретическая кинематика была изложена как самостоятельная ветвь аналитической механики. При этом Резаль пользуется элементами векторного исчисления, которое к 60-м годам XIX в. начало приобретать формы нового научного направления. Развивалось оно на основе идей Гамильтона, Мёбиуса, Беллавитиса и Грасмана. Пользовался Резаль векторным исчислением весьма осторожно. Шестая глава трактата Резаля посвящена теории ускорения второго порядка. По-видимому, она послужила идейным толчком для работы Сомова «Об ускорениях различных порядков», которая была доложена в Академии наук 11 декабря



О. И. Сомов

1863 г., а в следующем году опубликована в «Мемуарах»¹⁰ Академии наук. Сомов рассматривает ускорения до n -го порядка и при этом пользуется векторным методом в значительно большем объеме и более последовательно, чем это сделал Резаль.

Вопрос об ускорениях высших порядков Сомов исследовал и в дальнейших своих работах. В частности, в работе, посвященной ускорениям в относительном движении¹¹, он проводит дальнейшее развитие идей векторного метода и применяет его к различным задачам

механики. Термин «вектор» он не использует и производит операции над отрезками, которые называет линиями; над линиями он, следуя Резалю, производит операции геометрического сложения, вычитания и умножения. Скалярное произведение он называет «геометрическим произведением» и добавляет к правилу дифференцирования суммы (предложенному Резалем) правило дифференцирования геометрического произведения.

В 1872 г. Сомов опубликовал первую часть «Рациональной механики» — «Кинематику», где он пользуется уже почти всем аппаратом векторного исчисления, который применяется и в современных учебниках. Вторая часть курса была опубликована в двух выпусках: «Введение в статику и динамику» и две первые главы «Статики» в 1874 г. и вторая часть «Статики» в 1877 г. сыном О. И. Сомова — П. О. Сомовым.

О. И. Сомов впервые ввел в русскую высшую школу преподавание теоретической кинематики как отдельной ветви механики. Свой курс, где он последовательно при-

менял метод векторного исчисления, он начинает не со статики, что было обычным, а с кинематики, подчеркивая тем самым, что равновесие является лишь частным случаем движения.

После Сомова механику в Петербургском университете читал Д. К. Бобылев. Дмитрий Константинович Бобылев родился в 1842 г. в селе Печенеги Харьковской губернии. Учился в первом кадетском корпусе, затем в Михайловской артиллерийской академии, которую закончил в 1862 г. Прослушав некоторое время в Петербургском университете в качестве вольнослушателя математику, Бобылев в 1867 г. сдал экзамены на звание кандидата физико-математических наук и был оставлен при университете. Его преподавательская деятельность началась в 1871 г. в должности приват-доцента кафедры механики. После защиты в 1877 г. докторской диссертации он был избран на должность сначала экстраординарного, а затем и ординарного профессора. В 1896 г. Бобылев был избран членом-корреспондентом Петербургской академии наук. Умер он в 1917 г.

Занимался Д. К. Бобылев главным образом аналитической механикой и физикой. Его лекции по аналитической механике были изданы на стеклографе в 1877 г. Его учениками были И. В. Мещерский, Г. К. Суслов, П. О. Сомов, Г. В. Колосов, А. А. Фридман, Н. И. Мусхелишвили и другие выдающиеся механики.

В последней четверти века практической механикой в Петербурге занимался М. Ф. Окатов¹², который организовал при университете хороший кабинет практической механики. Кроме своей педагогической работы он неоднократно выступал в качестве эксперта по различным вопросам техники в промышленности и сельском хозяйстве.

Из ученых Петербургской математической школы, созданной Чебышевым, значительный вклад в развитие теории механизмов внес П. О. Сомов.

Павел Осипович Сомов родился в 1852 г. В 1873 г. окончил Петербургский университет со степенью кандидата математических наук. Некоторое время слушал математику и математическую физику в Берлинском университете, затем преподавал механику и математику (с

¹⁰ «Mémoires de l'Acad. des sciences», VII sér., 1864, t. VIII, N 5.
¹¹ О. И. Сомов. Об ускорениях различных порядков в относительном движении. — «Записки имп. Академии наук», 1866, т. IX, с. 121—132.

¹² Михаил Федорович Окатов (1829—1901). Окончил Московский университет. Доктор прикладной математики (1867). Доцент (1866), экстраординарный профессор (1867—1878).



П. О. Сомов

1874 г.) в Петербургском земледельческом институте, а после его преобразования — в Лесном институте (до 1887 г.). Одновременно читал теоретическую механику в минном офицерском классе в Кронштадте (1877—1880) и на Высших женских курсах (1880—1887).

В 1885 г. П. О. Сомов защитил в Петербургском университете магистерскую диссертацию на тему «Кинематика подобно-изменяемой системы двух измерений». В дальнейшем он продолжил и расширил свои занятия в этом направлении и применил их к исследо-

ванию шарнирных механизмов. В 1886/87 учебном году он читал в Петербургском университете курс теории механизмов. В 1887 г. был избран советом Варшавского университета на кафедру аналитической механики.

В 1891 г. П. О. Сомов защитил в Петербургском университете диссертацию «Кинематика коллинеарно-изменяемой системы общего вида» и получил степень доктора прикладной математики. Продолжая работу в Варшавском университете, он с 1898 г. начал чтение лекций по теоретической механике в только что основанном Варшавском политехническом институте; в 1904 г. эти лекции были изданы отдельной книгой. В том же году П. О. Сомов ушел в отставку и вернулся в Петербург. Здесь он преподавал в Технологическом и Горном институтах, затем с 1908 г. читал в университете ряд курсов по теоретической механике и «векториальный анализ»; работал также на Высших женских курсах.

Характерно, что по возвращении в Петербург П. О. Сомов совершенно отошел от научной работы: из изданных в этот период его работ известны только учебные пособия.

Умер П. О. Сомов в 1919 г.

Творчество П. О. Сомова в области кинематики механиз-

мов посвящено кинематике подобно-изменяемых и коллинеарно-изменяемых систем, теории шарнирных механизмов и вопросам теории структуры механизмов. Последнему вопросу Сомов посвятил свою известную статью «О степенях свободы кинематической цепи», опубликованную в 1887 г.

Вопросами структуры до него занимались Чебышев, Грюблер и Грасгоф, однако Сомов нашел свои пути. «В отличие от структурного анализа Грюблера, носящего чисто формальный характер и не указывающего пути к структурному синтезу механизмов, Сомов кладет в основу своего анализа наиболее естественный для изучения механизмов критерий — число степеней свободы, тем самым подводит солидную теоретическую базу под работы русских, советских ученых, посвященные вопросам структуры и классификации механизмов»¹³.

Определение понятия механизма у Сомова несколько отличается от определения Рело. «Мы будем называть механизмом такую кинематическую цепь, в которой каждая точка описывает определенную траекторию, если один из членов цепи будет при этом закреплен неподвижно, т. е. в которой ни один из членов не имеет более одной степени свободы»¹⁴. Таким образом, оно у Сомова шире понятия досмотровой замкнутой цепи у Рело и принужденность движения у него не исключает возможности существования механизмов с числом степеней свободы, большим одной. Сомов сам указывает, что «число степеней свободы какого-либо тела равно, как известно, числу тех независимых параметров, которыми определяется всякое перемещение этого тела. Поэтому, например, свободное неизменяемое тело трех измерений имеет, как известно, шесть степеней свободы, а двух измерений — три степени свободы; подобно-изменяемая система имеет семь степеней свободы, потому что кроме шести параметров перемещения неизменяемого тела она имеет произвольный параметр, определяющий расширение системы; однородно-изменяемая система имеет двенадцать степеней свободы, из которых шесть соответствуют перемещению неизменяемой системы, три — удлинениям по осям координат и три — сдвиганиям в плоскостях

¹³ И. И. Аргоболевский. Русская школа по теории механизмов и машин. — «Известия АН СССР, ОТН», 1943, вып. 7, с. 3—14.

¹⁴ П. О. Сомов. О степенях свободы кинематической цепи. — «Журнал Русского физ.-хим. о-ва», 1887, т. XIX, вып. 9, с. 443.

координат; коллинеарно-изменяемая система имеет пятнадцать степеней свободы, так как к двенадцати параметрам перемещения однородно-изменяемой системы присоединяются три параметра, определяющие раздвижение»¹⁵.

Полагая число членов простой замкнутой кинематической цепи — n , число степеней свободы каждого члена цепи — μ (причем μ одно и то же для каждого члена цепи), Сомов приходит к условию неизменяемой системы

$$n \leq \mu.$$

Если число членов простой кинематической цепи не более числа степеней свободы каждого из членов, взятого отдельно, если притом каждый из членов имеет по одной степени свободы по отношению к смежным с ним членам и все эти последние степени свободы в абсолютном движении различны, то кинематическая цепь будет представлять собой неизменяемую систему.

Затем Сомов исследует случай

$$n - \mu = 1.$$

и приходит к такому заключению: «Простая кинематическая цепь, составленная из членов, которые имеют каждый одинаковое число степеней свободы и соединены между собою так, что каждый из них имеет по одной степени свободы относительно смежных с ним членов, причем все эти последние степени свободы различны между собою в абсолютном движении, будет представлять собою механизм, если число членов ее будет на единицу больше числа степеней свободы каждого из этих членов, взятого в отдельности. Такую кинематическую цепь мы будем называть полной»¹⁶.

Могут быть случаи, когда и неполная или сокращенная кинематическая цепь дает механизм; в частности, если между ее членами есть соединения, обладающие избытком степеней свободы. Тогда для существования механизма необходимо, чтобы число членов такой цепи равнялось числу степеней свободы каждого члена, взятого отдельно, сложенному с единицей и уменьшенному на сумму всех избытков степеней свободы k , т. е.

$$n = \mu + 1 - k.$$

¹⁵ П. О. Сомов. О степенях свободы кинематической цепи, с. 446.

¹⁶ Там же, с. 450.

В случае, если каждый член цепи имеет различное число степеней свободы, эти результаты уже не имеют места; такие цепи Сомов называет неоднородными в отличие от однородных цепей. Анализируя подобные случаи, Сомов утверждает, что если в кинематической цепи два или большее число членов имеет большее число степеней свободы, чем прочие, тогда число членов цепи должно быть сокращено на сумму разностей между числами степеней свободы таких членов и числом степеней свободы остальных членов.

Затем рассматривается цепь, в которой есть член или члены с меньшим числом степеней свободы, чем все прочие.

Подробный анализ этого и подобных случаев и переход к общему случаю неоднородной кинематической цепи приводит Сомова к следующему выводу: «Сокращение или увеличение числа членов ее обуславливается: 1) введением или уничтожением разности между числами степеней свободы двух смежных членов и 2) увеличением или уменьшением числа степеней свободы, которое два смежных члена имеют один по отношению к другому. Это последнее уже зависит от способа соединения этих членов между собою»¹⁷.

Рассуждения сопровождаются детально разобранными примерами; как мы видим, исследование состоит в последовательном усложнении кинематической цепи, ее подробном изучении и установлении определенных зависимостей. Наиболее общим является анализ сложной кинематической цепи. Под таким названием Сомов понимает цепь, «если между ее членами существуют такие, которые соединены более чем с двумя другими членами этой цепи, или... если существуют члены, содержащие более двух кинематических элементов»¹⁸. Чтобы решить вопрос, может ли данная кинематическая сложная цепь служить механизмом, Сомов рассуждает следующим образом. Пусть N — число всех членов сложной кинематической цепи, n — число членов простой кинематической цепи, принимаемой за основание, μ — число степеней свободы отдельных членов цепи, предполагаемое одинаковым для всех членов цепи,

¹⁷ Там же, с. 461—462.

¹⁸ Там же.

v — число членов, дополняющих основную цепь, $m_1, m_2, m_3, \dots, m_v$ — числа членов этих отдельных ветвей, так что

$$N = n + m_1 + m_2 + \dots + m_v.$$

Вследствие введения всех дополнительных ветвей число степеней свободы основной цепи уменьшится на

$$(\mu - m_1 - 1) + (\mu - m_2 - 1) + \dots + (\mu - m_v - 1) = \\ = v\mu - (m_1 + m_2 + \dots + m_v) - v$$

единиц. Цепь обратится в механизм, если при закреплении одного из ее членов она сохранит одну степень свободы. Так как такое закрепление лишает ее μ степеней свободы, то отсюда следует, что

$$n + v\mu + m_1 + m_2 + \dots + m_v + v - \mu - 1$$

или

$$N - (\mu - 1)(v + 1) = 2.$$

Эта формула выражает не только необходимое, но и достаточное условие для того, чтобы сложная цепь была механизмом. Эта цепь будет иметь неопределенное движение при

$$N - (\mu - 1)(v + 1) > 2.$$

и будет неизменяемой системой при

$$N - (\mu - 1)(v + 1) < 2.$$

Далее Сомов рассматривает некоторые частные случаи¹⁹ и исключения из правил. Если учесть избытки степеней свободы между смежными членами s , то, принимая во внимание число потерянных степеней свободы в основной цепи $\sum k$, получим самую общую формулу

$$N + \sum k + s - (v + 1)(\mu - 1) = 2.$$

Теоретическое значение этой работы Сомова велико — он рассматривает в ней цепи самого общего вида как плоские, так и пространственные (которые в те времена еще не были известны механической технике) и таким образом прогнозирует дальнейшее развитие теории механизмов.

¹⁹ П. О. Сомов. О степенях свободы кинематической цепи, с. 474—475.

По глубине анализа этот мемуар Сомова является непосредственным предшественником работ Л. В. Ассюра.

Второй цикл работ Сомова был посвящен кинематическому исследованию систем, деформирующихся при движении. Начало изучения систем такого вида относится к середине 60-х годов, когда Груар обратил внимание на движение плоской подобно-изменяемой системы. Затем системы такого типа подверг тщательному исследованию Бурместер. Сомов указывает, что изучение кинематики такого рода систем имеет смысл в том отношении, что любая неизменяемая система является частным случаем системы коллинеарно-изменяемой. Поэтому кинематические свойства любой неизменяемой системы можно рассматривать как частный случай кинематических свойств коллинеарно-изменяемой системы. Таким образом, кинематика коллинеарно-изменяемой системы является обобщением, в котором сохраняются все существенные свойства движения как твердого тела, так и однородно-изменяемой, и в частности подобно-изменяемой системы.

Подобно-изменяемой называется такая система, при движении которой любая фигура, составленная из ее точек, остается подобной самой себе. Она принадлежит к коллинеарно-изменяемым системам и в то же время по своим кинематическим свойствам приближается к неизменяемым системам.

Кинематике коллинеарно-изменяемой системы Сомов посвятил докторскую диссертацию. Он отмечает, что первым указал на системы этого типа и их свойства В. Н. Лигин²⁰, хотя он и исследовал лишь системы двух измерений. Затем Бурместер исследовал некоторые кинематические свойства этих систем²¹, причем рассмотрел не только плоские системы, но и пространственные. Он выяснил их отличие от однородно-изменяемых систем, хотя и не указал на тот характерный элемент деформации, которым коллинеарно-изменяемые системы отличаются от однородно-изменяемых. Однако Бурместер рассматривал эти системы лишь чисто геометрическими приемами, и ему не удалось создать законченной теории; систематическое

²⁰ В. Н. Лигин. Обобщение некоторых геометрических свойств движения систем. — «Nouvelles Annales des Mathématiques», 1873, t. XII.

²¹ L. Burmester. «Zeitschrift für Mathematik und Physik», 1874 und 1875, Bd. XIX und XX.

изучение пространственной коллинеарно-изменяемой системы было выполнено Сомовым.

Работы Сомова 1895—1896 гг. были посвящены теории и практике винтового исчисления; затем он обратился к исследованию шарнирных механизмов (1900—1903), в частности, рассмотрел шарнирные механизмы с изменяемыми элементами и применение к шарнирным механизмам кинематики изменяемых тел.

В 1904 г. П. О. Сомов издал курс лекций по теоретической механике, в сущности — трактат, в котором значительное внимание уделяется вопросам механики машин. В частности, глава IV «Степени свободы системы точек и условия связи» является глубоким исследованием теории пар и кинематических цепей, основанным на собственных работах автора. В книге последовательно проводится векторный метод.

«Векториальный анализ и его приложения» был издан Сомовым уже после его возвращения в Петербург; это первая книга на русском языке, посвященная данному вопросу и, как указывает М. Кроу²², одна из 12 важнейших монографий по векторному исчислению, опубликованных в период с 1894 по 1910 г.

Как мы видим, ученые, работавшие в университетах на кафедрах прикладной математики и механики, в основном разрабатывали вопросы теории механизмов и машин. Более практическими вопросами занимались ученые, работавшие на кафедрах высших технических и военно-технических школ.

В 1865 г. на базе Рихельевского лицея в Одессе был основан Новороссийский университет, который вскоре стал важным научным центром в области прикладной механики. Основной тематикой исследовательской работы здесь стала теоретическая и прикладная кинематика; научная школа, созданная здесь В. Н. Лигиным, оказала влияние на развитие кинематики не только в России, но и за границей.

Валериан Николаевич Лигин родился в 1846 г. В 1869 г. он окончил Новороссийский университет со степенью кандидата математики. В 1872 г. защитил магистерскую диссертацию «Геометрическая теория движения

неизменяемой системы». Совет Новороссийского университета посылал ее на отзыв Шалю, который высоко оценил исследование Лигина и сообщил, что, по его мнению, за такую работу следовало бы дать степень не магистра, а доктора. В феврале 1874 г. Лигин защитил в Харьковском университете диссертацию «Обобщение некоторых геометрических свойств движения системы», за которую получил степень доктора прикладной математики.

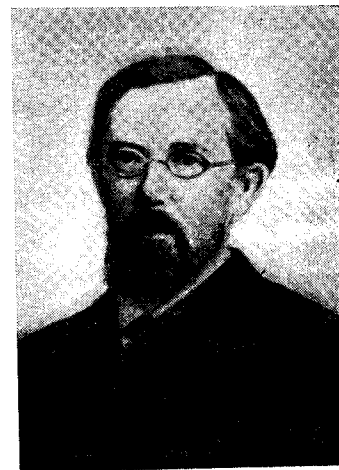
С 1872 г. В. Н. Лигин начал читать механику в Новороссийском университете. Здесь он проработал до 1895 г. Он читал на физико-математическом факультете такие курсы: теоретическую механику, практическую механику, теорию механизмов, гидравлику, теорию тепловых машин, механическую теорию тепла, элементарную механику, начертательную геометрию. Кроме того, он выступал с публичными лекциями по механике.

В 1895 г. Лигин оставил преподавание, в 1899 г. переехал в Варшаву, куда был назначен попечителем учебного округа. Умер он в 1900 г.

В магистерской диссертации Лигин доказал некоторые свойства движения неизменяемой системы, изложил ее кинематику и обобщил теорему Шаля о соотношении между кратчайшими расстояниями мгновенной оси от двух сдвоенных осей, которые соответствуют одному и тому же перемещению системы.

В докторской диссертации он исследовал теорию ускорений высших порядков, развивая в этом направлении идеи Сомова, Жордана, Резаля, Шелля, а также изучил коллинеарно-изменяемую систему в плоскопараллельном движении.

В. Н. Лигин был убежденным сторонником кинематики Ролю. В 1878 г. он издал брошюру «Очерк новых воз-



В. Н. Лигин

²² М. J. Crowe. A History of Vector Analysis. Notre Dame, 1967, p. 234—235.

зрений Рело на машину» — первое на русском языке изложение идей Рело. Но Лигин не удовлетворился пересказом и ввел ряд критических замечаний и исправлений. В частности, он дает такое определение машины: «Машина есть соединение способных к сопротивлению тел, устроенное таким образом, что при его посредстве можно механические силы природы заставить производить механическую работу в сопровождении только известных определенных движений». Основной заслугой Рело Лигин считал создание методики синтеза механизмов. Несмотря на то что Рело не смог решить задачу синтеза, все же им была выполнена большая подготовительная работа в этом направлении, каковой в сущности и является его «Теоретическая кинематика».

Лигин различает следующие виды пар.

1. Пары с тройкой подвижностью (шар и полый цилиндр).

2. Пары с двойкой подвижностью (полный и пустой цилиндр).

3. Пары с простой подвижностью (десмодромические пары).

Следуя Рело, он считает кинематическими парами лишь пары с простой подвижностью, так как два других вида пар встречаются крайне редко. Разбирая различие между низшими и высшими парами, Лигин приходит к выводу, что «высшие пары сравнительно редко применяются на практике и имеют преимущественно теоретический интерес». Вывод несколько неожиданный для ученого, который специально занимался исследованием теории зубчатых зацеплений. В работе «Опыт классификации зубчатых колес» (1874) Лигин пытается установить классификацию как известных уже зубчатых колес, так и таких, которые представлялись ему теоретически возможными. В ряде статей Лигин исследовал шарнирные механизмы. Он исследовал теорию инверсоров и ряд других механизмов для воспроизведения математических зависимостей, опубликовал первую библиографию работ по шарнирным механизмам (1883). Многие его работы были опубликованы во Франции, и поэтому его труды очень быстро вошли в общеевропейский научный оборот.

Занимался В. Н. Лигин и теоретической кинематикой. К ней в сущности относятся и обе его диссертации, а также монография «Кинематика» (1874). Таким образом,

почти все научное творчество Лигина, за исключением нескольких популярных работ, посвященных разным вопросам техники, имело основную направленность — изучение кинематики в самом широком смысле этого понятия: теоретические вопросы, теорию механизмов и кинематическую геометрию. Если добавить к этому, что Лигин был хорошим и умелым лектором, всегда вводившим своих слушателей в курс всего нового, что было сделано в области излагаемого предмета, то становится понятным, почему вокруг него в Новороссийском университете выросла школа очень талантливых ученых, посвятивших свое научное творчество кинематике механизмов. Среди них самый большой след в науке оставили Х. И. Гохман, И. М. Занчевский и Д. Н. Зейлигер.

Хаим Иегудович Гохман родился в 1851 г. в местечке Дрогичина Гродненской губернии. Окончил Херсонскую гимназию (1871), затем Новороссийский университет (1876) со званием кандидата и с золотой медалью за сочинение «Аналитический метод решения вопросов о зацеплениях» (напечатано в Московском математическом сборнике за 1877 г.) и был оставлен при университете «для подготовки к профессорскому званию». В 1881 г. он успешно сдал магистерский экзамен и получил командировку за границу на два года. По возвращении из-за границы в связи с тяжелыми материальными условиями Гохман вынужден был принять место инспектора в Житомирском еврейском учительском институте. Здесь он написал магистерскую работу «Теория зацеплений, обобщенная и развитая путем анализа». После закрытия института в 1877 г. Гохман был назначен приват-доцентом Новороссийского университета по кафедре механики и читал прикладную механику, а также некоторые части аналитической механики. В 1890 г. за работу «Кинематика машин» (т. I. Основы познания и созидания пар и механизмов) ему была присвоена степень доктора прикладной математики.

Умер Гохман в 1916 г., так и не закончив задуманной работы по кинематике машин. Однако и написанного им достаточно, чтобы считать его выдающимся ученым в области механики машин. Основные работы Гохмана по кинематике механизмов относятся к общей теории механизмов и теории зацепления. По его предположению, оба эти цикла должны были составить части одного целого.

«Предпринятый мною труд имеет целью помощью общих руководящих идей и по одному общему, строго выдержанному плану дать полное решение всех вопросов, касающихся кинематической стороны машин, исходя из основных идей Рело. Ввиду обширности такого труда я нашел целесообразным разделить его на четыре тома. Настоящий том служит как бы введением в кинематику машин. В нем излагаются лишь основы этой науки и все вопросы решаются в самом общем виде без детальной разработки. Во втором томе предполагается изложить подробную теорию познания и созидания пар поверхностей. В третьем томе будут описаны и изучены все типы существующих механизмов. Четвертый том, составляющий конечную цель всего сочинения, должен заключать в себе полное развитие тех принципов созидания новых механизмов, которые вкратце и только поверхностно изложены в VII главе этого сочинения, только в виде одних тезисов»²³.

К понятию механизма Гохман приходит, рассматривая два члена, которые обязательно содержатся во всяком механизме: один подвижный, воспроизводящий заданное механизму движение, а второй служащий основанием; роль всех прочих членов механизма второстепенная: «Механизмы есть такие искусственные сооружения, при помощи которых орудие (одно или несколько) принуждается двигаться вполне определенным и целесообразным движением по отношению к основанию... Элементарный механизм состоит из двух членов — орудия и основания — и есть пара»²⁴.

Необходимость учета степеней свободы при исследовании кинематических пар разрабатывается Гохманом с большой отчетливостью. Он классифицирует пары исходя из числа наложенных на них связей, устанавливая объективный критерий их систематики. «Стеснение считается n -й степени, если вследствие него принуждаются n элементов движения. При $n=0$ тело обладает совершенной свободой движения; при $n=6$ оно становится неподвижным. Примером второго случая могут служить все способы скрепления твердых тел... Пару со стеснением n -й степени

²³ Х. И. Гохман. Кинематика машин, т. I. Основы познания и созидания пар и механизмов. Одесса, 1890, с. XI—XII.

²⁴ Там же, с. 5.

мы будем называть парой n -го порядка. В паре n -го порядка остаются произвольными $(6-n)=m$ элементов движения. Поэтому вместо определения пары степенью стеснения мы можем определить ее степенью свободы, которая инвертируется числом остающихся произвольных элементов движения»²⁵.

По способу касания Гохман различает пары точечные, линейчатые, поверхностные и траекторные. Траекторными он называет пары с определенной траекторией одной точки. Исследуя виды пар, Гохман указывает, что анализ их «заключается в определении движения подвижного члена (как в абсолютном, так и в относительном движении) по данным сопряженным поверхностям и по способу их касания...»²⁶ Следовательно, число связей равно числу независимых уравнений, определяющих движение. Такие уравнения Гохман выводит для всех исследуемых типов пар, указывая при этом, что точечные пары могут быть любого порядка, линейчатые — любого порядка, начиная со второго, поверхностные — любого порядка, начиная с третьего. Траекторные пары он относит к линейчатым.

Во второй части книги Гохман разбирает методы синтеза или, следуя его терминологии, способы созидания пар. Он предлагает для этой цели четыре способа — аксидов, огибающих поверхностей траекторий и производящих линий и четыре производных способа — машин, касательных поверхностей эквидистант и круговых дуг. Он указывает при этом, что лучшие результаты можно получить способом огибающих поверхностей, но и прочие способы могут дать практически применимые результаты²⁷. Самому ему удалось решить задачу синтеза пар лишь для одного случая (но одного из важнейших). Следуя Оливье, он развил теорию зубчатых зацеплений и заслуженно считается одним из ее основоположников. Теории зацеплений Гохман посвятил две работы²⁸. В одной из них изложена аналитическая теория зацеплений и выведены

²⁵ Там же, с. 20.

²⁶ Х. И. Гохман. Кинематика машин, т. I, с. 24.

²⁷ Там же, с. 189.

²⁸ Х. И. Гохман. Аналитический метод решения вопроса о зацеплениях. М., изд. Московского матем. о-ва, 1877; он же. Общий практический способ профилирования зубьев в некруглых и круглых колесах. Одесса, 1890.

ее основные уравнения. Содержанием второй работы является не только теоретическое исследование этого вопроса, но и его применение к различным частным случаям.

12 октября 1889 г. на общем собрании Одесского отделения Русского технического общества Х. И. Гохман прочел доклад «Уравнение определений подвижности и вытекающая из него классификация механизмов», в котором было проведено обстоятельное исследование структуры механизмов. Ход его рассуждений отличается от рассуждений П. Л. Чебышева и М. Грюблера. Гохман не оценивает возможности отнесения изучаемой кинематической цепи к механизмам, а связывает уравнение подвижности с классом механизма. Все возможные механизмы он делит на разряды, которые характеризуются числом общих подвижностей, присущих каждому механизму разряда. Механизмы, которые имеют E общих подвижностей, он называет механизмами E -го разряда; $E < 6$. Механизмы определенного разряда могут включать пары лишь определенных порядков. «Большая часть имеющихся на практике машин составлена из механизмов 3-го разряда, преимущественно из плоских и сферических механизмов... Так как плоское движение составляется из двух поступательных параллельно плоскости движения и одного вращательного около перпендикуляра к ней, то, принимая последний за ось z -ов, мы вводим в наши исследования только три переменные величины — три элемента, а потому стеснение пар может быть только 1-го и 2-го относительных порядков. Нетрудно видеть, что вообще сумма степеней относительного стеснения и свободы должна равняться разряду механизма, т. е.

$$f + z_2 = E,$$

где f означает степень свободы пары, а z_2 — степень относительного стеснения. Так осевая пара есть пара:

- 5-го порядка в шестиразрядном механизме,
- 4-го порядка в пятиразрядном механизме,
- 3-го порядка в четырехразрядном механизме,
- 2-го порядка в трехразрядном механизме,
- 1-го порядка в двухразрядном механизме,
- 0-го порядка в одnorазрядном механизме»²⁹).

²⁹ Х. И. Гохман. Уравнение определений подвижности и вытекающая из него классификация механизмов. Одесса, 1889, с. 6.

Далее Гохман вводит понятие кинематического организма, представляющего собой совокупность членов и пар. «Всякий кинематический организм состоит из нескольких кинематических цепей. Число этих цепей, которое обозначим через μ , определяется наименьшим числом круговых путей, необходимых для того, чтобы обойти все пары и все члены организма, идя каждый раз от неподвижного члена и возвращаясь к нему; каждые два пути должны отличаться между собою по крайней мере одним членом»³⁰.

Обозначая через G число членов кинематического организма, а через π — число пар сопряженных поверхностей, имеем

$$G + \mu \pi = 1,$$

и Гохман приходит к такому выводу: чтобы кинематический организм мог быть механизмом, необходимо, чтобы между числами E , G , π , k_i (сумма степеней различных относительных стеснений, производимых всеми парами), L (число, равное сумме степеней свободы тех же пар) существовала зависимость

$$\begin{cases} E(G - 1)k_i = 1, \\ L - \mu E = 1, \\ E(\pi - \mu)k_i = 1. \end{cases}$$

Эту зависимость Гохман кладет в основу предлагаемой им классификации механизмов, так как она «обуславливает их существование, так сказать, решает их судьбу. Мы видели, что существование механизма как такового зависит как от его разряда, так и от степеней стеснения различных входящих в него пар. Поэтому мы прежде всего разделим все механизмы на шесть разрядов, по числу возможных переменных элементов движения, помещая в первом разряде всего три механизма, состоящие каждый из одной только облекающей пары, именно, призматической, осевой и винтовой пары»³¹.

В зависимости от порядков пар, входящих в механизм, разряды делятся на классы. Гохман считает, что в первом разряде — 1 класс, во втором — 1 класс, в третьем — 3 класса, в четвертом — 6 классов, в пятом — 15 классов и

³⁰ Там же, с. 7.

³¹ Там же, с. 13.

в шестом — 27 классов, всего 53 класса. Он вводит символическую запись механизмов. Например, механизм $(\mu/5, \pi/3, 4)$ принадлежит к пятому разряду и содержит пары третьего и четвертого порядков, уравнение его имеет вид: $5(G-1) - 3p_2 - 4p_4 = 1$.

В «Кинематике машин» Гохман несколько развивает эти идеи. В последней, седьмой, главе он пытается наметить пути синтеза, или, как он его называет, созидания механизмов, в основу которого кладет четыре принципа: замыкающих пар, неопределенных коэффициентов, последовательного преобразования движения и принцип разложения движения.

Для характеристики получаемого от механизма движения Гохман пользуется методикой Монжа (преобразование движений) и Виллиса (преобразование скоростей). Впрочем, в этом направлении дальше общих рассуждений он не идет.

Иван Михайлович Занчевский (1861—1928) закончил физико-математический факультет Новороссийского университета в 1883 г. В 1889 г. он защитил диссертацию на степень магистра прикладной математики, а в 1891 г. — на степень доктора прикладной математики. С 1888 по 1909 г. он работал в Новороссийском университете на кафедре механики, читал общий курс механики. Его магистерская диссертация «Теория винтов и приложение ее к механике» была первой работой в русской технической литературе, посвященной проблемам винтового исчисления. Последнее возникло в последней четверти XIX в. как развитие идей кинематической геометрии, определивших общее движение тела в пространстве как винтовое.

Винт является геометрическим образом, связывающим воедино вектор и пару, плоскость которой перпендикулярна вектору, с помощью которого можно описать и произвольное перемещение твердого тела в пространстве, и произвольную систему сил, действующих на тело. Одной из первых работ в этом направлении был «Предварительный набросок теории кватернионов»³² У. Клиффорда³³,

³² W. Clifford. Preliminary Scetch of Biquaternions.— «Proceedings of the London Mathematical Society», 1873, v. IV.

³³ Уильям Кингдом Клиффорд (William Kingdom Clifford, 1845—1879) — профессор математики университетского колледжа в Лондоне. Разработал алгебру бикватернионов и ее применение в неевклидовой геометрии.

в котором описание винтов дано с помощью комплексных чисел, состоящих из вещественного числа и произведения иррационального числа на множитель ω (при условии, что $\omega^2 = -1$). В 1876 г. Р. Болл опубликовал «Трактат о теории винтов»³⁴, в котором развил теорию винтов и указал на возможность их использования при исследовании движений. Таким образом выяснилась возможность использования винтового исчисления как аппарата для исследования пространственных движений; только что зарождавшаяся пространственная кинематика получила свой первый рабочий аппарат.

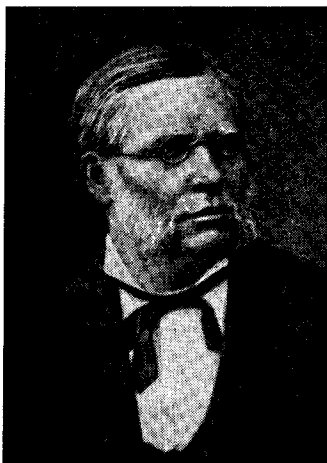
Дальнейшие исследования были выполнены А. П. Котельниковым в работе «Винтовое счисление и некоторые приложения его к геометрии и механике»³⁵, где он использовал идеи Клиффорда и сформулировал «принцип переносения», на основании которого построил винтовое исчисление в соответствии с операциями векторного исчисления.

И. М. Занчевский шел несколько иным путем: он связал теорию винтов с теорией линейных комплексов и эту теорию применил к геометрическому исследованию явлений удара (в своей докторской диссертации «Геометрически места в теории осей вращения», 1891). В ряде работ Занчевский продолжил исследование шарнирно-сочлененных систем, начатое в трудах Лигина.

Дмитрий Николаевич Зейлигер окончил физико-математический факультет Новороссийского университета в 1887 г. В 1891 г. он защитил магистерскую диссертацию «Механика подобно-изменяемого тела». В этой работе он развивал идеи, высказанные В. Н. Лигиным, Бурместером и П. О. Сомовым. Теорией движения подобно-изменяемого тела он продолжал заниматься и в последующие годы. В 1892 г. Зейлигер переехал в Казань и в 1894 г. защитил диссертацию «Теория движения подобно-изменяемого тела» на степень доктора прикладной математики. В 1895 г. он был избран экстраординарным, а в 1899 — ординарным профессором Казанского университета.

³⁴ R. Ball. A Treatise on the Theory of the Screws. Dublin, 1876.

³⁵ А. П. Котельников. Винтовое счисление и некоторые приложения его к геометрии и механике. Казань, 1895.



И. А. Вышнеградский

Основные работы Зейлигера относились к механике подобно-изменяемого тела: он изложил статику, кинематику и динамику его, причем использовал теорию винтов. Дальнейшие его работы относились к кинематической геометрии.

Основным центром России по подготовке инженеров в последней трети XIX в. продолжал оставаться Петербург. 1 августа 1862 г. получил права высшего учебного заведения Петербургский практический технологический институт с двумя отделениями: механическим и химическим. В числе предметов, обязательных для меха-

ников, была высшая математика, аналитическая и практическая механика, курс построения машин и проектирование механизмов. Позже, с 1873 г., в учебный план были включены курсы сопротивления материалов и построения деталей машин. Прикладную механику там читали И. А. Евневич (он читал также этот курс и в Институте гражданских инженеров), Н. П. Смирнов и В. Л. Кирпичев. Курс обычно состоял из четырех разделов: назначение машин, приводы машин, приемники, некоторые исполнительные механизмы. Таким образом, курс знакомил учащегося с машиной в целом; обычно к курсу добавлялись еще сведения о маховых колесах и регуляторах. Подобные курсы читались и в других высших учебных заведениях: разница заключалась лишь в некоторых формулировках и в освещении того или иного частного вопроса. К началу 70-х годов почти во всех русских высших технических школах курс построения деталей машин выделялся из курса прикладной механики.

Петербургские ученые, вышедшие из школы Остроградского, занимались главным образом вопросами прикладной динамики. Одним из наиболее выдающихся учеников М. В. Остроградского был И. А. Вышнеградский.

Иван Алексеевич Вышнеградский родился в 1831 г. в Вышнем Волочке Тверской губернии. В 1843 г. он поступил в Тверскую семинарию, а в 1846 г. — на физико-математический факультет Главного педагогического института, который окончил в 1851 г. с серебряной медалью.

Как и институте, так и по его окончании И. А. Вышнеградский пользовался большой поддержкой и помощью Остроградского, обнаружившего его большие способности. В 1854 г. он защитил в Петербургском университете диссертацию «О движении системы материальных точек, определенной полными дифференциальными уравнениями» и получил степень магистра математических наук. В этом же году он начал читать математику в Михайловском артиллерийском училище, в 1855 г. преобразованном в академию.

В 1859 г. И. А. Вышнеградский был командирован артиллерийской академией за границу «для подготовки к занятию профессора практической механики». Изучал там он главным образом машиностроение, практическое — на фабриках и заводах Германии, Франции и Англии, теоретическое — на лекциях Редтенбахера. В 1862 г., по возвращении из-за границы, Вышнеградский получил кафедру практической механики в артиллерийской академии, затем в Петербургском практическом технологическом институте.

«Будучи в течение многих лет профессором в этих учебных заведениях, — пишет о нем В. Л. Кирпичев, — И. А. Вышнеградский образовал несколько поколений механиков и строителей машин; ученики его теперь раскаты по всему лицу нашего обширного отечества и, пользуясь сообщенными им знаниями, успешно работают теоретически и практически на поприще машиностроения. Оно теперь стало у нас туземным делом, тогда как до возвращения И. А. Вышнеградского из-за границы этой специальности почти не было в России. Это один из лучших примеров того огромного значения, которое могут представить учитель и школа для действительной жизни. Для достижения таких результатов И. А. Вышнеградскому пришлось работать очень много и почти без отдыха в качестве профессора. Он читал самые разнообразные курсы по механике и машиностроению, и почти нет такой

области обширной механической науки, которая не сделалась бы предметом его внимания»³⁶.

И. А. Вышнеградский был выдающимся математиком и крупнейшим инженером-машиностроителем. С 1859 г. он принимал участие в работе Артиллерийского комитета, где занимался главным образом вопросами усовершенствования материальной части русской артиллерии и реконструкции военных заводов. С 1867 по 1878 г. он работал также в Главном артиллерийском управлении инженером-механиком. «Деятельность Ивана Алексеевича [Вышнеградского] в Артиллерийском ведомстве относится к тому времени, когда входили в употребление орудия все большего и большего калибра и громадного веса. Необходимо было сделать для них разнообразные подъемные машины: мостовые и плавучие краны, медведки и трикебали для перевозки пушек и др. Условия, которые ставились конструктору, были весьма тяжелы: иногда требовалось, чтобы машины, поднимающие громадные грузы, сами были очень легки и переносны.

Самой замечательной работой Ивана Алексеевича в области практического машиностроения была постройка Охтенского порохового завода, для которого он устроил двигатель (три турбины Жюльваля по 140 сил каждая) и проводочную передачу работы от двигателя к отдельным пороховым фабрикам, выстроенным на протяжении нескольких верст, в расстоянии 25 сажен одна от другой, и многие исполнительные механизмы»³⁷.

В своей педагогической работе И. А. Вышнеградский особенное внимание обращал на конструкторскую подготовку студентов. Его курс подъемных машин был в сущности введением в машиностроение. Студенты, прослушавшие этот курс, выполняли под руководством профессора проект подъемной машины. Вышнеградский любил повторять, что тот, кто сумел сконструировать подъемный кран, может построить любую другую машину.

В 1877—1878 гг. И. А. Вышнеградский опубликовал в «Известиях Технологического института» два мемуара

„О регуляторах непрямого действия“, которые тогда же были изданы на немецком и французском языках, где были заложены основания теории регулирования машин.

Очень много внимания Вышнеградский уделял вопросам постановки высшего технического образования в России. В 1884 г. он составил проект развития профессионального образования, в котором предусматривал подготовку не только инженеров и техников, но и квалифицированных рабочих. Он участвовал в реорганизации Петербургского технологического института, директором которого был с 1875 по 1884 г. В 1888 г. он был избран почетным членом Петербургской академии наук.

В 1885 г. он принял деятельное участие в организации третьего технологического института в стране — Харьковского. В 1887 г. Вышнеградский был назначен управляющим Министерства финансов, а в 1888 г. — министром финансов и с этого времени отошел от научной и педагогической деятельности. Скончался он в 1895 г.

Как мы видели, история регулятора начинается в XI или XII столетии и связана с развитием ветряных мельниц. Спорадически регулятор применялся в паровых машинах в XVIII в. В 1784 г. Уатт получил патент на паровую машину двойного действия, которым был предусмотрен механический центробежный регулятор, управляющий поступлением пара в цилиндр машины. С этого времени в сущности и начинается история автоматического регулирования; регуляторы Уатта применялись в конце XVIII и начале XIX в.

Но уже к середине XIX в. появились мощные быстроходные паровые машины, характер регулирования хода которых принципиально изменился. В старых машинах были большие маховики и легкие регуляторы со значительным коэффициентом неравномерности, в новых — размеры и вес маховиков уменьшились, а требования к точности регулирования повысились. Но решение задачи улучшения регулирования оказалось не простым: пробовали решать ее путем уменьшения трения, однако это влекло за собой нарушение условий устойчивости.казалось также, что ее можно решить путем уменьшения коэффициента неравномерности, изменяя конструкцию регулятора в сторону приближения к астатическому регулятору с коэффициентом неравномерности, равным нулю.

³⁶ В. Л. Кирпичев. Иван Алексеевич Вышнеградский как профессор и ученый. — В кн.: Д. К. Максвелл, И. А. Вышнеградский, А. Стобола. Теория автоматического регулирования. М., Изд-во АН СССР, 1949, с. 310.

³⁷ Там же, с. 317—318.

Одним из первых пытался решить задачу регулирования английский астроном и изобретатель Эри (1801—1892)³⁸. Он предложил присоединять к муфте конического регулятора особый водяной катаракт, развивающий силу трения, пропорциональную скорости муфты, что должно ликвидировать вредные колебания регулятора. Однако теории регулятора с катарактом он не создал.

В 1868 г. знаменитый английский физик Д. К. Максвелл³⁹ в работе «О регуляторах»⁴⁰ рассмотрел ряд задач об устойчивости движения машины, развил теорию малых колебаний некоторой системы вокруг установившегося движения и пришел к выводу о предпочтительности применения регуляторов астатического типа. Исследование Максвелла было чисто теоретическим и не дало решения, нужного для инженеров.

И. А. Вышнеградский подошел к решению этой задачи с точки зрения применения ее результатов на практике. Он доказал, что как раз астатический регулятор не пригоден для регулирования и сформулировал знаменитые тезисы:

- 1) без неравномерности нет регулятора;
- 2) без катаракта нет регулятора.

«После работы Вышнеградского динамика простейшей схемы регулирования — схемы Уатта — стала предельно прозрачной. Возникло отчетливое понимание, что машина и регулятор — это одно целое, что при переходных режимах возможно возникновение самораскачивания системы машина — регулятор, и, что особенно важно, у инженеров возникло понимание, в какую сторону влияют изменения тех или иных конструктивных параметров этой системы на возникновение такого самораскачивания»⁴¹. Вышне-

градский ввел в расчетную практику графический метод разделения плоскости параметров системы регулирования на области устойчивости.

Таким образом, к динамике машин была добавлена еще одна глава, положившая начало теории автоматического регулирования и очень плодотворно повлиявшая на развитие чистой и прикладной математики.

И. А. Вышнеградский обладал лекторским талантом. «...Он умел просто и ясно, — пишет В. Л. Кирпичев, — излагать самые трудные теории или, лучше сказать, при его исследовании в науке вовсе не оказывалось ни темных, ни трудных мест. В этом отношении он являлся вполне достойным своих знаменитых учителей Остроградского и Родтсбахера, которые оба славились своими лекторскими талантами»⁴². И. А. Вышнеградский создал школу русских машиностроителей и ученых в области теоретического машиностроения.

Вышнеградский создал кружок, названный «пентагоном обществу», куда входили пятеро ученых, работавших в области прикладной механики, в том числе ученики Вышнеградского Н. П. Петров и В. Л. Кирпичев.

Николай Павлович Петров родился в 1836 г. в Трубчевско Орловской губернии. Учился в Петербургском дворянском полку (военно-учебном заведении типа кадетского корпуса), затем, с 1855 г., — в Инженерной академии, где слушал лекции М. В. Остроградского. В 1858 г. был оставлен при академии на кафедре математики «для подготовки к профессорскому званию». Слушал лекции в Петербургском университете по высшей математике и в Технологическом институте — по прикладной механике, которую читал И. А. Вышнеградский.

В 1872 г., после смерти М. В. Остроградского, Петров начал читать курс высшей математики в Инженерной академии, а в 1867 г. его избрали адъюнкт-профессором прикладной механики. Одновременно он начал читать прикладную механику в Технологическом институте.

В 1871 г. Н. П. Петров начал заниматься новым для того времени вопросом — исследованием подвижного состава железных дорог. Не оставляя профессоры в Технологическом институте (где он читал до 1892 г.), он поступил

³⁸ On the Regulator of the Clockwork for effecting Uniform Movement of Equatoreales. — «Memoires of RAS», 1840, XI, p. 249; Supplement... Ibid., 1850—1851, XX, p. 115.

³⁹ Джеймс Кларк Максвелл (James Clark Maxwell, 1831—1879). Окончил Кембриджский университет. Преподавал в Кембриджском, Абердинском и Лондонском университетах.

⁴⁰ J. C. Maxwell. On Governors. — «Proceedings of the RS», 1868, XVI, p. 270—283.

⁴¹ А. А. Андронов, И. Н. Вознесенский. О работах Д. К. Максвелла, И. А. Вышнеградского и А. Стодоль в области теории регулирования машин. — В кн.: Д. К. Максвелл, И. А. Вышнеградский, А. Стодоль. Теория автоматического регулирования, с. 268.

⁴² В. Л. Кирпичев. Иван Александрович Вышнеградский как профессор и ученый, с. 319.

в Главное общество российских железных дорог на должность ревизора. С 1888 по 1892 г. он работал председателем Управления казенных железных дорог, а в 1892 г. был назначен председателем инженерного совета Министерства путей сообщения, иными словами, техническим руководителем министерства. В 1894 г. был избран почетным членом Российской академии наук. Постепенно Петров отходил от педагогической и практической деятельности и последние годы своей жизни посвятил исключительно научной деятельности.

Очень много внимания уделял Н. П. Петров Русскому техническому обществу, основанному в 1866 г., председателем которого избирался несколько раз. Умер он в 1920 г.

Главным направлением исследовательской деятельности Петрова было явление трения.

История проблемы жидкостной смазки ведет свое начало от Ньютона, который сформулировал законы вязкого трения во 2-й книге своих «Начал». Затем их обобщил Навье в работе 1823 г., придав им математическую форму. В 1845 г. Джорж Стокс (George Stokes, 1819—1903) в статье «О теориях внутреннего трения в движущейся жидкости» исследовал касательные усилия, возникающие между слоями жидкости. Выводы его в равной мере относились к вязкой жидкости, воде и воздуху. Все это были теоретические исследования без какой-либо опытной проверки. Не известны были свойства смазочных масел, явления, происходившие в смазочном слое, особенно острым был вопрос о смазке машин и подвижного состава железных дорог.

29 января 1881 г. Н. П. Петров на заседании механического отдела Русского технического общества внес предложение об организации исследования коэффициентов трения для различных смазочных масел. Он предложил произвести исследование смазочных масел в условиях, соответствующих действительным, и изучить все параметры в зависимости от всех переменных величин. В работу включились другие ученые и инженеры, но наиболее существенную и важную ее часть выполнил сам Петров. В результате своих опытов он пришел к гидродинамической теории трения, сущность которой заключается в следующем:

«Смазывающий слой, помещающийся между двумя не прикасающимися одна к другой поверхностями, отделяет

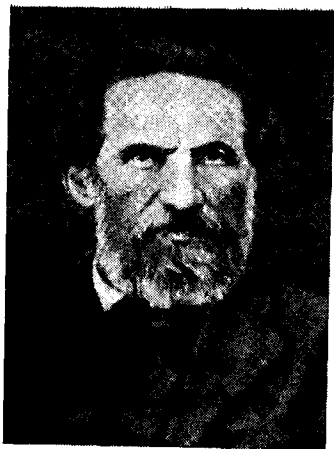
их друг от друга, прилипая к каждой из них. Во время движения машины это прилипание увлекает одну часть слоя, заставляя ее двигаться вместе с прилегающей к ней металлической частью, и в то же время удерживает другую часть слоя около другой металлической поверхности. Если бы не было трения внутри жидкости, эти два слоя стали бы двигаться одна по другой вполне беспрепятственно, вовсе не увлекая и не задерживая друг друга.

В таком случае понятно, что одна машинная часть с приставшей к ней частью смазочного слоя стала бы вполне беспрепятственно двигаться около другой части смазывающего слоя и удерживающей ее другой машинной части. Это движение частей происходило бы вовсе без трения. Подобного явления никогда не бывает именно потому, что все части смазывающего слоя не могут двигаться одна относительно другой без всякого трения»⁴³.

В середине XIX в. в Петербурге возникло два направления, которым следовали русские механики. Наиболее яркими представителями этих направлений были П. Л. Чебышев и Н. П. Петров. Основой всего творчества П. Л. Чебышева является совокупность технических идей, связанных с развитием паровой машины. «Конструкции тогдашних паровых машин,— пишет В. В. Голубев,— теория направляющих механизмов в них, так называемых прямил, были исходным пунктом его [Чебышева] исследований, чисто математических, об аппроксимации функций, о функциях, наименее отклоняющихся от нуля; а с другой стороны, они повели к чисто механическим исследованиям П. Л. Чебышева, которые положили начало разработке в СССР вопросов кинематики и динамики механизмов и машин блестящими современными нам теоретиками.

Работы Н. П. Петрова шли по совершенно иному руслу. Ученик Остроградского, он, по-видимому, воспринял от своего учителя убеждение в важности для инженера чисто теоретической науки. И основной чертой всей его деятельности было внесение точной науки, глубокой математической теории в чисто инженерные области. Де-

⁴³ Н. П. Петров. Описание и результаты опытов над трением жидкостей и машин.— «Известия Петербургского техн. ин-та», 1885, т. V, с. 8.



В. Л. Кирпичев

визом его научной и инженерной деятельности было: «Без светоча теории практика не может идти к истинному совершенствованию»⁴⁴.

Этот девиз Петров положил в основу и своей педагогической деятельности. Вопросам преподавания в технической школе он посвятил 13 работ. Основой технического образования он считал предметы теоретического цикла: математику, механику, физику, химию. Знания по этим предметам у студентов должны быть настолько глубокими, чтобы они могли не только изучать технические дисциплины, но и совершенствоваться в самих теоретических науках, ибо техника развивается необычайно быстро и инженеру на практике постоянно приходится сталкиваться с новыми техническими средствами.

Виктор Львович Кирпичев (1845—1913) родился в Петербурге. Его отец преподавал математику в инженерном училище. Учился он в Полоцком кадетском корпусе, в артиллерийском училище и Артиллерийской академии, которую закончил в 1869 г. В 1870 г. был избран (по конкурсу) преподавателем механики на химическое отделение Петербургского технологического института (на конкурсе прочел в присутствии И. А. Вышнеградского публичную лекцию «О законах подобия»). В 1877 г. В. Л. Кирпичев был утвержден профессором технологического института по кафедре прикладной механики; в этом институте он читал в разное время курсы: графостатики, сопротивления материалов, построения деталей машин, грузоподъемных машин, а также руководил проектированием.

⁴⁴ В. В. Голубев. Русские работы по механике и влияние их на развитие мировой науки.— «Ученые записки МГУ», 1947, вып. 91, с. 100.

В 1885 г. В. Л. Кирпичев по совету Вышнеградского приступил к организации Харьковского технологического института, директором которого был до 30 января 1898 г. Он, а также его преемник Д. С. Зернов сделали этот институт одной из лучших русских технических школ (в 1893 г. Кирпичев со Всемирной выставки в Чикаго, где он был членом экспертной комиссии, привез для института турбину Лавалья — одну из первых турбин в России). Там собрался мощный педагогический коллектив, в частности, теоретическую механику читал А. М. Ляпунов, математику — В. А. Стеклов, К. А. Андреев, М. А. Тихомандрицкий. Педагогические воззрения Кирпичева нашли свое отражение в докладе «Экспериментальная механика и механические лаборатории в высших специальных школах», который он прочел 3 января 1896 г. на Втором съезде русских деятелей по техническому и профессиональному образованию. В этом докладе он выдвинул следующие положения.

1. В высших технических учебных заведениях, посвященных механической специальности, должно быть введено систематическое преподавание экспериментальных приемов исследования материалов и машин.

2. Этому преподаванию должна предшествовать общая подготовка к экспериментированию, состоящая в изучении основных приемов исследования, применяемых в физике.

3. Изучение специальных приемов экспериментальной механики в особых механических лабораториях должно продолжаться не менее двух лет.

4. Для студентов старшего курса по желанию можно назначать специальные экспериментальные работы.

Эти положения В. Л. Кирпичев проводил в жизнь в Харьковском технологическом, а впоследствии и в Киевском политехническом институтах.

Как и Н. П. Петров, Кирпичев придавал очень большое значение теоретической подготовке студентов, будучи уверенным, что помимо узкоприкладной роли высшая математика необходима, чтобы, как он говорил, «образовать голову и сделать хорошего инженера».

В 1897 г. Кирпичев принял активное участие в разработке учебных планов новых политехнических институтов, которые были намечены к открытию в те годы, а затем был назначен директором Киевского политехниче-

ского института и приступил к его организации и строительству. В 1902 г. он принял активное участие в работе комиссии по преобразованию высших учебных заведений в качестве председателя отдела специальных учебных заведений. К этому времени его здоровье ухудшилось, и он вынужден был уйти в отставку с поста директора Киевского политехнического института. Летом 1903 г. стал председателем строительной комиссии Петербургского политехнического института и в декабре того же года избран преподавателем прикладной и строительной механики. Одновременно он продолжал свои «беседы» по разным вопросам прикладной механики, начатые еще в Киеве. Кроме знаменитых «Бесед о механике», впоследствии изданных, он провел со своими учениками беседы о теории эллиптических функций, о вариационном исчислении, номографии, оптическом методе изучения деформаций, уравнивании машин, теории регуляторов и ряд других.

В. Л. Кирпичев оставил немного печатных работ, но они вошли в золотой фонд русской технической литературы. Его классическая трилогия — «Беседы о механике», «Основания графической статики» и «Лишние неизвестные в строительной механике» — еще много лет будет настольной книгой инженеров и преподавателей механики. Кирпичева можно назвать поэтом технического творчества. В 1896 г. А. И. Куприн напечатал повесть «Молох» — результат наблюдений писателя, работавшего в 90-х годах на рельсопрокатном заводе в Донбассе. Для него завод был чудовищем, угнетавшим человеческую личность. Кирпичев же искал в технике эстетику. В одной из своих речей он сказал, что инженеры обязаны заботиться о красоте сооружений, а потому должны полчать и элементы художественного образования. «На многих одно слово машина производит самое удручающее впечатление. Она рассматривается как темная сила, с которой нельзя бороться, которой человек должен служить как идолу, требующему иногда человеческих жертв. Один автор, описывая завод, говорит: «Машины царили везде, и около них жалкими казались эти угрюмые люди». Сделаем еще шаг по пути этих взглядов и придется вспомнить сказку, рассказанную у Рело, про дальнейшую будущность человеческого рода, а именно: усовершенствование машин дошло до того, что они взбун-

товались против людей, поработили их и заставили служить себе.

Такие взгляды не могут разделяться инженерами, которые сами делают машины и другие сооружения, заводы, железные дороги, воплощая свои творческие мысли в формы, сделанные из железа и камней. Ведь мысль, превратившаяся в дело, в факт, не может производить удручающее впечатление, а напротив того, самое светлое и радостное. Инженер никогда не согласится считать машину или каменную постройку господином, которому должны служить люди, как идолу, или допустить, что иногда необходимы жертвы этому чудовищу. Мы — господа, а машины — наши слуги, и кто сомневается в том, тем я посоветую посмотреть действие машины, называемой *servo-motor*, т. е. порабощенный двигатель»⁴⁵.

В другой из своих программных статей он пишет: «Я уже упоминал, что из всех наук наибольшая сила фантазии требуется в математике, и подтверждением этого служит тот факт, что среди математиков мы встречаем многих изобретателей. Укажу на Архимеда, Кардана, Паскаля (гидравлический пресс, арифметическая машина), Роберваля, Дезарга, Лагира, Ивана Бернулли... Эйлера... Понселе, Клапейрона (опережение и перекрытие золотников), Поселье, Гарта, Сильвестера (плагиограф, изоклинограф) и, наконец, на нашего знаменитого математика П. Л. Чебышева с его множеством механических изобретений»⁴⁶. Далее он пишет: «Очень интересно и поучительно изучать разнообразие тем и задач, которые стремятся разрешить изобретатели. Наш знаменитый ученый П. Л. Чебышев, говоря о темах и задачах, разрабатываемых математиками, высказался следующим образом: в прежнее время задачи предлагали боги (он имеет в виду делийскую задачу об удвоении куба, которая, по мифическому сказанию, была предложена самим Аполлоном, и другие задачи, исходившие из храмов классической древности), потом задачи предлагали полубоги (здесь Чебышев подразумевает великих математиков 17—18 столетий, между которыми был распространен

⁴⁵ В. Л. Кирпичев. *Vivat, Crescat, Floreat*. Речь, произнесенная 31 августа 1898 г. — В кн.: Сборник материалов по истории возникновения Киевского политехнического института. Киев, 1914, с. 29.

⁴⁶ В. Л. Кирпичев. Значение фантазии для инженеров. — «Известия Киевского политехн. ин-та», 1903, кн. 3, с. 15.

обычай задавать друг другу задачи). Теперь, продолжает Чебышев, задачи ставятся массой и ее нуждами»⁴⁷.

В. Л. Кирпичев был выдающимся преподавателем: он не только прекрасно читал лекции, но также интересно вел практические занятия. Он был одним из первых русских ученых, кто занялся разработкой графоаналитического метода построения планов скоростей и ускорений. Графические методы в силу наглядности Кирпичев предпочитал всем другим.

К началу XX в. система высшего технического образования в России (не учитывая военного и военно-технического) включала следующие институты: Петербургский технологический, Институт гражданских инженеров, Горный институт инженеров путей сообщения, Лесной, Электротехнический институт, Московское высшее техническое училище, Московское инженерное училище ведомства путей сообщения, Сельскохозяйственный институт, Харьковский технологический, Киевский, Варшавский и Рижский политехнические, Ново-Александровский институт сельского хозяйства и лесоводства. Во все эти учебные заведения в 1899 г. было подано 7050 заявлений, а принято 2497 человек.

В качестве примера курса прикладной механики, изучавшегося в русских технических школах, можно рассмотреть курс И. А. Евневича⁴⁸, читанный им в Морской академии, Петербургском технологическом институте, Институте гражданских инженеров и Электротехническом, который неоднократно переиздавался. По своему содержанию он несколько напоминает французские учебники. Евневич рассматривает не только твердые, но и жидкие и газообразные звенья. В соответствии с этим он дает следующее определение машины. «Машиною мы называем систему тел твердых (металлы, дерево, камни), гибких (веревки, цепи, ремни) и жидких (вода, воздух, пар), связанных между собой таким образом, что при посредстве этой системы можно передавать и видоизменять или

преобразовывать движение и в то же время производить некоторую полезную работу». Он пользуется классификацией Виллиса (как и большинство других русских машиноведов), а о теориях Рело не упоминает. Большое внимание русские машиноведы обращали на изложение теории зубчатых зацеплений, которая занимала обычно одно из важнейших мест в курсе прикладной механики.

В начале 60-х годов по инициативе инженеров — выпускников Петербургского практического технологического института было организовано Русское техническое общество. Согласно его уставу, утвержденному в 1866 г., оно должно было содействовать развитию техники и промышленности в России. В течение нескольких недель после открытия общества в его члены было принято более 300 чел. Общество организовало библиотеку, технический музей, химическую лабораторию, начало издавать свой журнал «Записки Русского технического общества». К 80-м годам XIX в. Общество насчитывало уже 800 человек (среди них Н. П. Петров, Д. И. Менделеев, И. А. Вышнеградский, С. В. Кербедз, А. Н. Лодыгин, Д. И. Журавский, Н. А. Белелюбский, Д. К. Чернов и другие крупные инженеры и ученые) и состояло из 14 отделений.

Итак, к началу XX в. в России было несколько сильных, прекрасно организованных технических учебных заведений, в которых преподавалась механика машин (правда, под разными названиями). В последней четверти века, по инициативе Вышнеградского, из этого предмета было выделено учение о построении деталей машин. Общей программы не существовало, и в сущности каждый преподаватель строил курс, сообразуясь со своими научными и инженерными интересами; кроме учения о механизмах и общей теории машин в состав курса входили элементы гидравлики, учение о гидравлических двигателях и паровой машине. Благодаря трудам выдающихся русских ученых — П. Л. Чебышева, В. Н. Лигина, Н. П. Петрова, И. А. Вышнеградского, Х. И. Гохмана, П. О. Сомова механика машин достигла высокого уровня и были начаты принципиально новые исследования: учение о структуре механизмов, учение о шарнирных механизмах, синтез механизмов, теория жидкостного трения, учение о регуляторах. Характерно, что основную работу в этом направлении выполнили выпускники физико-математических факультетов русских университетов.

⁴⁷ В. Л. Кирпичев. Значение фантазии для инженеров, с. 16.

⁴⁸ Ипполит Антонович Евневич (1831—1903) по окончании Могилевской гимназии поступил на физико-математический факультет Петербургского университета, который окончил в 1856 г. Профессор Петербургского технологического института по кафедре построения машин (1862), магистр прикладной математики (1868).

ДИНАМИКА МАШИН В ПОСЛЕДНЕЙ ТРЕТИ XIX в.

Основной энергетической машиной на протяжении всего XIX в. продолжала оставаться паровая машина. В конце века, в связи с развернувшимся строительством электростанций, начинают быстро расти размеры и рабочие скорости стационарных паровых машин. Появляются более экономичные машины с числом оборотов от 200 до 600 в минуту, однако, оказалось, мощность их можно увеличивать до определенных пределов. Строились также машины очень больших габаритов, но они допускали небольшое число оборотов и были неэкономичными.

К концу века появились промышленные образцы турбин. В 1889 г. шведский инженер Карл Густав де Лаваль (1845—1921) создал одноступенчатую паровую турбину небольшой мощности. В 1893 г. на Чикагской всемирной выставке демонстрировались турбины Лавала мощностью около 5 л. с. с числом оборотов в минуту 30 000. Позже одноступенчатые турбины Лавала достигали мощности 300 л. с.

Многоступенчатую реактивную турбину создал в 1885 г. английский инженер Чарльз Парсонс (1854—1931). Его турбина давала возможность получать большие мощности при значительно меньшем числе оборотов; уже к концу столетия турбины этого типа стали основным оборудованием для мощных электростанций.

Таким образом, к концу столетия на смену кривошипно-ползунному механизму пришел двухзвенный механизм вращательного типа. По тому же принципу строились электрические генераторы и двигатели. Однако эти машины ротационного типа привлекли внимание машиноведов несколько позже, и в сущности динамика машин в XIX в. базировалась именно на изучении машин с кривошипно-ползунным механизмом.

В последней трети века появился еще один двигатель,

созданный на базе кривошипно-ползунного механизма, сыгравший впоследствии важную роль в деле создания транспортных и самодвижущихся машин: двигатель внутреннего сгорания. Первый четырехтактный газовый двигатель построил в 1876 г. немецкий инженер Н. Отто (1832—1891). Через десять лет Г. Даймлер (1834—1900) создал бензиновый двигатель внутреннего сгорания, пригодный для транспортных машин. С этого времени начинается эпоха автомобилестроения.

И все же основным двигателем, и стационарным, и транспортным, продолжала оставаться паровая машина. Главным средством сухопутного транспорта в XIX в. были железные дороги, и мы видели, какое влияние они оказали на развитие промышленности. К. Маркс в письме к Н. Ф. Даниельсону 10 апреля 1879 г. писал: «Железные дороги возникли прежде всего в качестве „увенчания здания“ в тех странах, где современная промышленность достигла наибольшего развития, — в Англии, Соединенных Штатах, Бельгии, Франции и пр. Я называю их „увенчанием здания“ не только потому, что это были наконец (наряду с океанским пароходством и телеграфом) средства сообщения, адекватные современным средствам производства, но также и потому, что они послужили основой для возникновения громадных акционерных компаний и стали вместе с тем новым отправным пунктом для создания разного рода других акционерных компаний, начиная с банковских. Одним словом, они дали такой сильный толчок концентрации капитала, которого раньше никто не предвидел, и в то же время ускорили и расширили в громадной степени космополитическую деятельность ссудного капитала, благодаря чему весь мир оказался охвачен сетью финансового мошенничества и взаимной задолженности — этой капиталистической формы международного братства»¹.

История строительства железных дорог весьма поучительна для понимания развития прикладной и строительной механики в XIX в. Необычайное разнообразие сооружений — насыпей, мостов, путевых строений, подвижного и тягового состава — поставило перед механиками много задач и стимулировало развитие целого ряда ветвей ме-

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс. Избранные письма. М., Госполитиздат, 1953, с. 319.

ханики, не говоря уже о других науках, а также о делах техники и технологии.

На протяжении почти 60 лет проводились экспериментальные и теоретические исследования паровозов, при этом они непрерывно совершенствовались: к концу века достигли мощности 1200 л. с. при скорости 90 км/час. В связи с паровой машиной и, в частности, с локомотивом развивались на протяжении всего века и исследования по динамике машин: науке предстояло решить несколько важных задач: расчет маховика, определение и уравнивание сил инерции, кинематика и динамика кривошипно-ползунного механизма, определение сил, действующих на отдельные звенья (детали) машины, учет сил трения, причем не теоретически предполагаемых, а реальных, регулирование хода машины. Очень рано была учтена принципиальная разница между регулированием периодических возмущений хода машины с помощью маховика и аperiodических возмущений, когда приходилось прибегать к помощи регулятора, однако на протяжении первой половины века соответствующей теории создано не было.

Расчет маховика и нахождение правильных его размеров, применительно к данной конкретной машине, пробовали сперва выполнить с помощью аналитических и даже экспериментальных методов, но уже очень скоро обратились к графическим методам. Как мы уже видели, графические методы в механике (и не только в механике) являются одним из важнейших результатов научной и инженерной мысли XIX в.: сочетание наглядности и достаточной точности сделало их общепринятым способом инженерных расчетов.

Первое графическое решение динамической задачи было сделано Кориолисом: в мемуаре 1832 г. «О влиянии момента инерции балансира паровой машины и его средней скорости на равномерность вращательного движения, сообщаемого возвратно-поступательным движением поршня маховику» он построил диаграмму касательных усилий, диаграмму работ и диаграмму переменных приведенных масс поршня и коромысла. Кориолис считал, что графический метод станет единственным, которому будут обучать конструкторов. Следующий графический метод построения диаграммы касательных сил и основанный на нем приближенный расчет маховика был предложен Мореном в

1846 г. Его метод, оказавший большое влияние на развитие теории маховика, имел дефекты по сравнению с методом Кориолиса: Морен не учитывал влияния поступательно движущихся масс машины, однако он указал на конечность длины шатуна и на то обстоятельство, что чем короче шатун, тем тяжелее должен быть маховик.

Морен имел дело с тихоходными машинами, средняя скорость поршня в которых не поднималась выше 1 м/сек. Однако развитие паровых и в особенности транспортных машин повлекло за собой значительное увеличение этой скорости, которая во второй половине XIX в. достигла 7 м/сек. Первым учел это обстоятельство английский инженер Портер, который разработал графические изображения сил инерции движущихся возвратно-поступательно масс при равномерном вращении кривошипа и давлений, передаваемых шатуну за вычетом сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс².

В 1870 г. И. Радингер³ опубликовал монографию «О паровых машинах с высокой скоростью поршня», в которой повторил решение Портера. Правда, Радингер допустил серьезную ошибку, посчитав возвратно-поступательно движущейся массой сумму массы кривошипа, отнесенной к его пальцу, шатуна, поршня, скалки и крестовины. Поправки к методу Радингера были предложены Дженкином⁴.

Таким образом машиноведы вплотную подошли к созданию метода кинетостатики: если можно было учесть силы инерции всех частей механизма в процессе его движения, то, следовательно, можно было применить и принцип Даламбера.

Быше мы видели, что уже во второй половине XIX в. методы графической статики сооружений были развиты

² Charles Porter. On the Allen engine and governor.— «Engineering», 1868, t. V, p. 159, 184.

³ Иоганн Радингер (Johann Edler von Radinger, 1842—1901). Ассистент (1863), затем профессор (1875) машиностроения в Венском политехникуме. Занимался также практической деятельностью: смонтировал в Австро-Венгрии несколько фабрик. Член-корреспондент Венской академии наук (1900). Австрийский союз инженеров и архитекторов поставил Радингеру памятник перед зданием Венской высшей технической школы.

⁴ F. Jenkine. On the application of graphic methods to the determination of the efficiency of machinery.— «Transactions of the Royal Society of Edinburgh», 1876—1878, t. XXVIII, P. I, p. 1—32; P. II, p. 703—715.

в достаточной степени. Прежде чем перейти к кинестатике, логически следовало создать методы статики механизмов. Это было выполнено доцентом Ахенского политехнического института Р. Преллем.

В 1874 г. Прелль опубликовал «Опыт графической динамики». В первой части этой весьма содержательной работы он излагает метод графического дифференцирования и интегрирования и некоторые другие кинематические графические построения (впрочем, к методам графической кинематики он неоднократно возвращается и далее); во второй части рассматривает действие внешних сил на свободно движущуюся неизменяемую систему масс.

В третьей части рассматривается действие внешних сил на механизмы, и во введении автор указывает, что задумал ее как имеющую самостоятельное значение работу. Так, в шестой главе этой части он излагает свой метод построения планов скоростей и ускорений и очень близко подходит к теореме Жуковского о жестком рычаге. В частности, доказывает следующую теорему: «Две внешние силы обеспечивают равновесие механизма, если сумма их моментов относительно мгновенного центра вращения и с учетом смысла вращения равна нулю»⁵. В седьмой главе он обобщает эту теорему и исследует равновесие внешних сил, приложенных к некоторой системе взаимозависимых простых механизмов, находящейся в движении. При этом определяет машину как связанный между собой ряд простых механизмов, где движение любой точки какого-либо механизма обуславливается скоростями всех точек механической системы⁶.

В восьмой главе, посвященной исследованию действия внешних сил, которые не уравниваются на механизме, автор впервые использует принцип Даламбера. «В большинстве задач, которые поставила практика, непосредственно не требуется уравнивания на механизме внешних сил; только сумма их работ становится через определенные промежутки времени равной нулю. Этим обеспечивается периодическое движение механизма. В особенности это относится к таким важным для практики механизмам, как кривошипно-ползунный...

⁵ R. Proell. Versuch einer graphischen Dynamik. Leipzig, 1874, S. 145—146.

⁶ R. Proell. Versuch einer graphischen Dynamik, S. 156.

Если механизм находится под действием внешних сил в состоянии периодического движения, то движение его точек оказывается или ускоренным, или замедленным, в зависимости от их избытка. Этот избыток можно с помощью указанных выше действий вычислить аналитически или графически, а тем самым определить равновесие внешних сил.

Для развития соответствующего метода будем исходить из принципа Даламбера. Его применение дает возможность определить изменение движения механизма, учитывая действие внешних сил. Последние следует разделить на два класса, на сохраняющиеся (так называемые действующие) и потерянные силы, которые определяются следующим образом: потерянные силы являются частью внешних сил, которые определяются связями системы. Они не влияют на движение механизма. Разность между суммой заданных внешних сил и суммой потерянных сил дает сумму сохраняющихся (действующих) сил. Они и приводят механизм в определенное состояние движения.

В соответствии с принципом Даламбера потерянные силы взаимно уравниваются.

Поскольку мы теперь в состоянии... найти равновесие внешних сил на механизме, а также и на машинной системе, то, следовательно, мы получим и сохраняющиеся (действующие) силы, если отнимем от заданных внешних сил те их части, которые сами по себе находятся в равновесии»⁷.

В девятой главе автор рассматривает те внутренние силы, которые возникают в механизме или его связях вследствие движения масс. Сюда, в частности, относятся силы инерции и трения.

Таково вкратце содержание этой замечательной книги, в которой впервые были поставлены многие вопросы кинематики и динамики механизмов, получившие свое дальнейшее развитие в последней четверти XIX и первой четверти XX в. На работы Прелля ссылались мало и неохотно: мы уже видели, что одновременно с ним (а возможно, и немного позже) методы кинематического анализа разрабатывали такие ученые, как Мор, Смит, Бурместер. Несколько позже начал исследовательскую деятельность

⁷ R. Proell. Versuch einer graphischen Dynamik, S. 168.

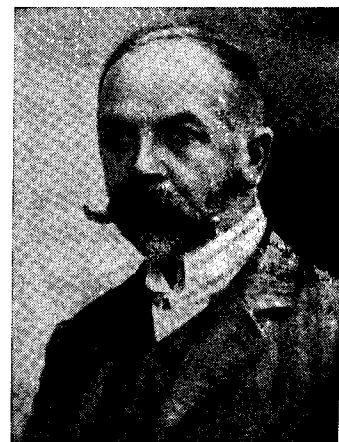
Виттенбауэр, обеспечивший своими работами по графической статике, кинестатике и динамике их дальнейшее развитие. А между тем теории, развитые Преллем, были известны современным ему машиноведам: его статьи печатались в 1872 и 1873 гг. в таком распространенном журнале, как «*Civilingenieur*».

Сам Прелль своими предшественниками называет Цейнера и Кульмана; особенное влияние оказала на него работа по кинематической геометрии Аронгольда, которая привела его к мысли, что для задач динамики машин также можно разработать метод графического решения. Метод этот был тем более необходим, что для техники того времени задача движения кривошипно-шатунного механизма под действием заданных сил была весьма трудной и графическое решение ее облегчило бы инженерный и теоретический «подход» к делу.

Работа Прелля открыла целую серию исследований, посвященных графическим методам статики и динамики машин и пытавшихся удовлетворить нужды техников. Как позже отметил Виттенбауэр, во второй половине XIX в., а точнее в последней его четверти, стало заметным отчуждение между теоретиками и техниками. Техники жаловались, что не получают ответа от теоретиков на свои недоуменные вопросы. Кроме того, в последней четверти века опять проявился рецидив недоверия к математическим методам. Техники даже пытались существенно сократить объем математического образования в инженерных школах, чтобы физическое мышление не угнеталось формальными математическими рассуждениями. Особенно сильно эта тенденция проявилась в немецкой технической школе. Здесь «...отхождение технического исследования от математического метода шло все дальше, интерес к теоретическим исследованиям в инженерных кругах падал и редакции большинства технических журналов или совсем не принимали статей математического содержания, или принимали их с отвращением. И не по той причине, что читатели не понимали этих работ, но потому, что результаты их зачастую оказывались в кричащем противоречии с действительностью»⁸.

⁸ F. Wittenbauer. Zukunft und Ziele der technischen Mechanik. Graz, 1911, S. 26.

Но не только спор между теорией и практикой влиял на смену интересов машиноведов и изменение тематики их исследований. «Интересно,— пишет Виттенбауэр,— что даже исследовательские области технической механики подчиняются моде — даже упорной и систематической моде, которая идет от простейших к труднейшим проблемам, но в определенные периоды времени отдаст предпочтение одному определенному направлению исследований. Я вспоминаю о тех годах, когда графостатика была верхом науки и все журналы были переполнены более



Ф. Виттенбауэр

или менее ценными работами из этой области. Затем... интерес к графической статике сменился интересом к кинематике. Сегодня же исследователи предпочитают заниматься вопросами динамики, побуждаемые к этому определенными задачами, обусловленными практикой... И везде оказывалось, что с помощью математики можно проникнуть в сущность дела лишь до определенной степени»⁹. И продолжает: «Графостатика уже вылилась в самостоятельную науку, чего, к сожалению, нельзя сказать о динамике. Уже есть целый ряд начал и положений, однако все еще отсутствует систематическое изложение графической динамики и это является задачей будущего... То, что не сможет облегчить труднейшие вычисления, то выполнят построения в своем обозримом виде, если только их привести в систему. Графика является языком инженера, и картина дает более наглядное представление о явлении, чем формула; график станет постоянным спутником практика во всех возможных направлениях мысли»¹⁰. Рассуждения Виттенбауэра интересны и как свидетельство очевидца, непосредственно принимавшего участие в со-

⁹ F. Wittenbauer. Zukunft und Ziele der technischen Mechanik, S. 29.

¹⁰ Там же, с. 32.

бытиях. Конечно, преимущественное развитие того или иного направления механики машин не было делом лишь моды (хотя мода в научных направлениях несомненна), более существенную роль здесь играют требования практики.

Что касается графических методов, то они начали быстро развиваться именно в последней четверти века. Тогда же французский математик Окань¹¹ опубликовал свои работы в области номографии. Таким образом математика стала разрабатывать собственный графический язык как средство для приближенных вычислений.

Несколько позже Прелля вопросами теории графических методов в механике стал заниматься О. Мор. Начал он с графостатики и графических методов вычислений¹²; более поздние его работы относятся к графическим методам в кинематике и динамике. В ряде статей Мор разрабатывает основания метода кинетостатики с учетом определения усилий в кинематических парах. Несколько позже он занялся методом определения сил инерции.

В 1879 г. профессор Рейнско-Вестфальской политехнической школы (в Ахене) Г. Герман издал работу «К графической статике приводов машин», в которой развил исследования Радингера и Прелля, более тщательно разработав вопросы теории трения в кинематических парах.

В 1883 г. в упоминавшейся уже выше работе Грасгофф развил понятие переменной массы. Это понятие, оказавшееся весьма плодотворным в дальнейшем, не было новым: за 100 с лишним лет до этого им пользовался Г. Кестнер в книге «Начальные основания высшей математики» (1765); однако как Кестнер, так и ученые следующих поколений пользовались постоянной приведенной массой, причем лишь при анализе вращательного движения. И только Кориолис, а затем и Понселе начинают пользоваться переменной приведенной массой. Грасгофф предложил также способ приведения масс с помощью мгновенного центра скоростей, послуживший основанием

для кинетостатического метода замещающих точек, развитого Виттенбауэром.

Еще одной важной вехой при создании кинетостатики явился метод касательных усилий Портера — Радингера. Было выяснено, что силы инерции следует учитывать не только в частных случаях, например при расчете маховика, и что их расчет имеет не только теоретическое значение: повышение рабочих скоростей стационарных и особенно транспортных двигателей вызвало много неприятных последствий: локомотивы начали сходиться с рельсов, действие сил инерции в паровых двигателях разбалтывало конструкции судов и пр.

Значительную роль в развитии динамики машин сыграла работа Шлика¹³ об уравнивании поступательно движущихся масс¹⁴. Задача об уравнивании, весьма актуальная для того времени, в практику изготовления судовых двигателей была введена и теоретически разрешена американским инженером Тейлором. По-видимому, Шлик не знал о существовании решения Тейлора, выполненного тремя годами ранее. Шлик, подобно Радингеру, предположил, что на кривошип действуют односторонние составляющие центробежной силы (влияние конечности длины шатуна он не учитывал). Он дал полное и достаточно корректное решение задачи.

Спор о патенте Шлика стимулировал развитие интереса к задачам динамики машин как в среде инженеро-практиков, так и у преподавателей высшей школы. Своего апогея спор достиг в 1897 г.¹⁵ Не случайно, что тогда же достиг своего апогея и спор о роли высшей математики в технической школе: было высказано мнение, что следует прекратить преподавание высшей математики и возвратиться к математике элементарной.

Появившиеся исследования в области теории уравнивания машин вновь привлекли внимание исследова-

¹¹ Морис д'Окань (Maurice d'Ocagne, 1862—1938) — инженер и математик, член Парижской академии наук (1922). Основопологающие работы по номографии выполнил в 1884—1890 гг.

¹² О. Mohr. Die graphische Statik und das graphische Rechnen (Literarische Revue). — «Civilingenieur», 1875, Bd. XXI, S. 229—238.

¹³ Эрнст Отто Шлик (Ernst Otto Schlick, 1840—1913) — инженер-механик. Учился в Дрезденском политехникуме. Работал корабельным инженером в Пеште и Фиуме. С 1875 г. руководил верфями в Киле, где строил военные и торговые суда. В 1896—1908 гг. директор германского Ллойда.

¹⁴ E. Schlick. Über den Einfluss des Aufstellungsortes der Dampfmaschinen auf die Vibrationserscheinungen bei Dampfpern. — «Zeitschrift des VDI», 1894, Bd. XXXVIII, S. 1091.

¹⁵ См.: «Zeitschrift des VDI», 1898, Bd. XLII, S. 1313; 1899, Bd. XLIII, S. 992.

телей к теории привода, но уже не с точки зрения кинематики, а оценки передачи работы. Одним из первых исследований в этом направлении была книга Лоренца о динамике привода¹⁶. Лоренц¹⁷ исследует плоское движение звена, связанного в двух точках с двумя кривыми, воспроизводимыми соседними звеньями. Если центр тяжести звена лежит на линии, соединяющей обе ведущие точки, что практически всегда имеет место, то масса звена раскладывается по правилу моментов на обе точки.

В 1895 г. вышла из печати также работа итальянского инженера Альеви¹⁸, посвященная кинематике и динамике кривошипно-ползунного механизма.

Таким образом, на протяжении всего XIX в. динамика машин создавалась на базе детального изучения динамических явлений в паровой машине и ее кривошипно-ползунном механизме. Естественно, что это не могло не повлиять и на развитие соответствующих исследовательских методов: динамика рабочих и технологических машин оказалась совершенно не разработанной и это явилось одной из причин недоверия к механике машин.

В последней четверти века из общего учения о машинах выделились две науки: машиноведение и учение о деталях машин. Машиноведение представляло собой в значительной степени описательный курс машин как энергетических, так и технологических. М. Рюльман¹⁹ опубликовал работу «Общее машиноведение» в четырех томах, энциклопедическое сочинение, снабженное многими историческими экскурсами и до настоящего времени не потерявшее своего

значения. Рюльману также принадлежат «Лекции по истории технической механики»²⁰. Эту книгу Рюльман задумал написать в двух частях, но, к сожалению, вторая часть, посвященная истории науки о машинах, осталась ненаписанной.

Важное значение для истории механики машин имеют очерки Теодора Бека, публиковавшиеся сперва в «*Civilingenieur*», а затем в «*Zeitschrift des VDI*». Большинство этих очерков было издано отдельной книгой в 1899 г.²¹ Бек ввел в научный оборот много полузабытых и совсем забытых имен и показал, что история машин — это непрерывный процесс и что зачастую трудно установить, кто является действительным автором того или иного изобретения. К сожалению, в своем историческом сочинении Бек не выходит за рамки Европы (если не считать Герона Александрийского), что смещает перспективу событий.

Одним из важнейших направлений науки о машинах, выделившимся в самостоятельное научное направление в последней четверти века, было учение о деталях машин. Это учение, составлявшее ранее часть курса прикладной механики, уже в трудах Вейсбаха и Редтенбахера приобретает определенную самостоятельность и даже становится важнейшей частью курса. Густав Цейнер в Цюрихе, Адам фон Бург в Вене, Вибе²² в Берлине и другие машиноведы поставили перед собой цель освободить науку о машинах от односторонней подчиненности математике, но, увлекшись этой идеей, ограничили ее изучением реальных тел, составляющих машину, — креплений и некоторых общих деталей: валов, осей, подшипников, зубчатых колес. Что касается специальных деталей, характерных для конкретных машин, то они остались «за бортом». Несомненно, это обстоятельство в определенной степени затормозило развитие науки о машинах.

¹⁶ Н. Lorenz. *Dynamik der Kurbelgetriebe*. Leipzig, 1901.

¹⁷ Ганс Лоренц (Hans Lorenz, род. в 1865 г.) — профессор Галльского (до 1896 г.) и Гёттингенского (1908) университетов. После первой мировой войны читал механику в Дандигской высшей технической школе.

¹⁸ Лоренцо Альеви (Lorenzo Allievi, 1856—1941) окончил техническую школу в Риме (1879), занимался железнодорожным делом, затем работал в области гидроэлектротехники и электрохимии.

¹⁹ Мориц Рюльман (Christian Moritz Rühlmann, 1811—1896). Окончил Дрезденское техническое учебное заведение. С 1835 г. работал там помощником учителя математики. В 1836 г. был приглашен в Хемницкую ремесленную школу в качестве ординарного профессора прикладной математики. Посещал Лейпцигский университет. В 1840 г. Йенский университет присвоил ему степень доктора философии. В этом же году он был приглашен в Ганноверскую высшую ремесленную школу профессором машиностроения и прикладной математики; здесь он проработал 50 лет.

²⁰ M. Rühlmann. *Vorträge über Geschichte der technischen Mechanik und damit in Zusammenhang stehenden Wissenschaften*. Leipzig, 1885.

²¹ T. Beck. *Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaues*. Berlin, 1899; 2-te Aufl., 1900.

²² Карл Вибе (Friedrich Karl Wiebe, 1819—1881). Учился в Берлинском ремесленном институте по 1842 г., затем там преподавал. Написал «Учение о простых деталях машин» (*Lehre zu den einfachen Maschinenteilen*, Bd. 1—2. Berlin, 1854—1860). С 1858 г. издавал сборник эскизов для инженеров и машиностроителей (*Scizzenbuch für Ingenieur und Maschinenbauer*) — вышли 133 выпуска.

мозило развитие и науки о машинах, и практического машиностроения.

Наиболее выдающимся представителем учения о деталях машин, в определенной степени и ответственным за создавшееся положение, был Карл Бах.

Карл Бах (1847—1931) родился в Саксонии, в Штольберге. Четырнадцать лет он оставил школу и поступил учеником к слесарю, а затем на завод Гартмана в Хемниде. Некоторое время учился в школе мастеров, а в 1866 г. поступил в Дрезденский политехникум. В 1872—1873 гг. учился у Грасгофа в Карлсруэ, затем несколько лет работал инженером на различных заводах. В 1878 г. был приглашен на должность профессора машиностроения в Штутгартское высшее техническое училище, где проработал 44 года.

К тому времени, когда началась преподавательская деятельность Баха, наука о машинах в немецких высших технических школах уже делилась на два курса: теоретическое машиностроение и учение о построении машин. Научные основы учения о построении машин излагались лишь постольку, поскольку они входили в круг интересов профессора. Лабораторные испытания материалов, как правило, не производились, а основным методом конструирования было проектирование машин «по подобию».

Бах поставил перед собой задачу — научно обосновать и разработать расчетные методы конструирования деталей машин. Но для этого нужно было предварительно изучить машиностроение. Не имея почти никакой помощи, в течение 11 лет он работал над этой задачей. В 1881 г. он добился организации небольшой испытательной лаборатории. На основании исследований Бах пришел к выводу, что допускаемые напряжения для трех главных случаев нагрузки следует брать в отношении 3:2:1. По этому принципу он составил таблицы, которые вопреки его идее были восприняты не как метод, а как доказанная закономерность.

Всего Бах написал около 350 работ на разные темы машиностроения и машиностроительного материаловедения. Его знаменитый курс «Детали машин» («Maschinenelemente») многократно переиздавался на немецком языке и переводился на другие, в том числе и на русский.

В конце века в самостоятельные научные направления начали оформляться также теория трения и теория регу-

ляторов. Для теории трения наиболее выдающуюся роль сыграла гидродинамическая теория Н. П. Петрова, что было отмечено и теоретиками, и практиками. В 1886 г. Н. Е. Жуковский опубликовал статью, в которой высказал предположение, что сила, уравнивающая давление шипа в подшипнике, возникает вследствие неконцентричности их поверхностей, указав тем самым на принципиально важную особенность работы подшипника в условиях жидкостной смазки. В 1887 г. в статье «О движении вязкой жидкости, заключенной между вращающимися эксцентрическими цилиндрическими поверхностями» Жуковский дал первое частное решение задачи Петрова.

В том же 1887 г. гидродинамическую теорию трения предложил А. В. Гречанинов. Сущность ее заключалась также в необходимости эксцентриситета трущихся поверхностей, однако при расчете он допустил ошибку, обнаруженную Н. П. Петровым.

После первых публикаций Петрова появились английские исследования. В 1883 г. инженер Тоуэр опубликовал результаты экспериментов над трением смазанных тел в условиях обильной смазки. 1886 г. известный физик Осборн Рейнольдс²³ опубликовал работу «Гидродинамическая теория смазки и ее применение к опытам Тоуэра», в которой исследовал движение жидкости в зазоре между шипом и подшипником при помощи дифференциальных уравнений вязкой несжимаемой жидкости. В сущности Рейнольдс повторил решение Петрова, но не учел при этом трения между жидкостью и смазываемой ею поверхностью, что привело его к ошибке, которую также обнаружил Петров.

В конце XIX в. появилось несколько теоретических и экспериментальных работ по гидродинамической теории смазки. Решение Рейнольдса упростил Зоммерфельд, показавший зависимость между силой трения, нагрузкой и скоростью. В 1900 г. в «Записках Императорской академии наук» вышла работа Н. П. Петрова «Трение в машинах» (на французском языке), в которой автор подытожил свои исследования в этой области. В 1906 г.

²³ Осборн Рейнольдс (Osborne Reynolds, 1842—1912) изучил условия превращения ламинарного движения жидкости в турбулентное и определял безразмерное число, так называемое число Рейнольдса.

была опубликована работа Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина (написанная в 1904 г.) «О трении смазочного слоя между шипом и подшипником», в которой им удалось дать окончательное решение задачи Петрова и определить давления в слое смазки. Уравнения, предложенные Зоммерфельдом, оказались частным случаем уравнений Жуковского — Чаплыгина.

В области теории регулирования машин после работ Вышнеградского большой вклад был сделан словацким ученым Аурелем Стодолой.

Аурель Стодола родился в 1859 г. в г. Липтовский Святей Микулас. По окончании реального училища он поступил в Будапештский политехникум, который закончил в 1878 г. После этого он три года учился в Цюрихском политехникуме, затем, работая инженером-механиком и преподавателем, изучал математику в Берлинском университете (1883) и Сорбонне (1884). С 1866 по 1892 г. работал в Праге на одном из лучших машиностроительных заводов, где познакомился с практикой конструирования паровых машин и гидротурбин. В 1892 г. Стодола был приглашен на кафедру машиностроения в Цюрихский политехнический институт: кафедру эту он занимал до 1929 г., когда вышел в отставку. Умер он в 1942 г.

Исследовательская работа Стодолы относилась к теории автоматического регулирования, научным основаниям проектирования и конструирования паровых турбин, научным основаниям проектирования и конструирования газовых турбин. Его исследование «О регулировании турбин» (в двух частях) было опубликовано в журнале «Schweizerische Bauzeitung» в 1893 и 1894 гг.

Стодола линеаризировал задачу непрямого регулирования, тем самым продолжив работы Вышнеградского. Фундаментальная работа Стодолы в области регулирования «Принцип регулирования Сименсов и американские инерционные регуляторы», появившаяся в 1899 г. в журнале Общества германских инженеров, относится к теории прямого регулирования. В этой работе Стодола впервые исследует регуляторы, в которых осуществляется так называемое воздействие по производной. Сначала он распространяет на эти регуляторы линеаризованную теорию Вышнеградского. Затем очень простым приемом ему удается учесть влияние сухого трения, т. е. решить важную нелинейную задачу. Наконец, он точно устанавли-

вает преимущества и недостатки плоских регуляторов, у которых для получения перестановочного усилия используются как центробежные, так и тангенциальные силы инерции²⁴.

Стодола был горячим приверженцем эксперимента, но в то же время не забывал и о преимуществах, связанных с использованием математических методов в задачах техники. В 1897 г. он выступил на I Всемирном математическом конгрессе в Цюрихе с докладом «Об отношении техники к математике».

Ряд исследований в области теории регулирования хода машин выполнили Леоте (1885), Беттреп (1893—1894), Толле (1895), Лекорию (1897). Именно в этом направлении динамики машин все чаще начинают появляться французские работы.

Последнее десятилетие XIX в. во Франции характеризуется бурным развитием техники и возникновением ее новых отраслей. Ведущую роль приобретает машиностроение. Постепенно меняется и французская техническая школа: хотя традиционная структура ее остается прежней, однако теоретические курсы начинают приближаться к требованиям практики. В качестве примера можно привести франко-бельгийский курс прикладной механики Бульвепа²⁵. Из девяти его выпусков собственно прикладной механике был посвящен первый, содержание второго выпуска составило учение о живых, гидравлических и пневматических двигателях, третьего — теория тепловых машин, четвертого — девятого — специальное машиноведение, т. е. содержание традиционно, причем традиция эта имеет 80-летнюю давность — началом ее послужил еще курс Ашетта. Но кинематика читалась отдельно, и частности, курс кинематики прочел даже Пуанкаре²⁶. Во Франции были проведены основополагающие исследования в области кинематической геометрии, и впервые теоретическая кинематика выделилась как самостоятель-

²⁴ Аурель Стодола (О. Н. Вознесенский. Краткий биографический очерк). — В кн.: Д. К. Максвелл, И. А. Вышнеградский, А. Стодола. Теория автоматического регулирования. М., Изд-во АН СССР, 1949, с. 357.

²⁵ J. Boulvin. Cours de mécanique appliquée aux machines professé à l'école spéciale du génie civil de Gand, f. 1. Théorie générale des mécanismes. Paris, 1891.

²⁶ H. Poincaré. Cinématique et mécanismes. Paris, 1897.

ная ветвь (не в смысле понятий Рело, а как составная часть механики аналитической).

В учебнике Бульвена поэтому содержание первого выпуска составила динамика машин, поскольку предполагается, что студент уже знаком с курсом (прикладной) кинематики. В первой главе Бульвен выводит общее уравнение движения машины и подвергает его весьма обстоятельному исследованию. Вторая глава посвящена теории сопротивлений, третья — исследованию механизма под действием сил, четвертая — теории регулирования хода машины; здесь рассмотрены как центробежные регуляторы, так и теория маховика. В пятой главе приводятся сведения, относящиеся к методам экспериментального исследования машин и механизмов. Таким образом, в книге содержатся уже почти все разделы «стандартного» курса динамики машин. Вместе с тем бросается в глаза резкое отличие от современных учебников других стран, особенностью которых являются достаточно развитые к тому времени графические и графоаналитические методы. Над развитием последних одновременно работали немецкие, английские, русские и итальянские ученые. Французские расчетные методы были в основном аналитическими, хотя вклад ученых Франции в разработку графических методов (например, в номографию) был также немалым.

В странах Западной Европы механика машин развивалась и как предмет преподавания, и как научное направление.

В Голландии значительную роль в разработке исследований в области механики машин сыграл Дельфтский политехнический институт. Здесь в конце века начал свою преподавательскую деятельность Ф. Вас²⁷, которым были выполнены исследования в области теории шарнирных механизмов, а также в области динамики машин²⁸.

²⁷ Франсискус Иоганнес Вас (Franciscus Johannes Vaes, род. 1867). Ассистент в Дельфтском политехническом институте, с 1900 по 1932 г. профессор прикладной механики в Роттердамской академии изящных искусств и технических наук. Написал один из первых очерков истории теории механизмов: *Geschiedenis van een onderdeel der mechanica*. — «Polytechnisch Weekblad», 1935, Bd. 29, p. 731, 744, 759, 774.

²⁸ F. J. Vaes. *Studie over de theorie van Radinger*. — «Tijdschrift van het Koninklijk Instituut van ingenieurs», 1894, p. 225—236.

Обучение в Дельфтском политехническом институте (основанном в 1864 г.), как и в Цюрихском политехникуме (1855), строилось по примеру Парижской политехнической школы; она была принята за образец рядом немецких политехникумов. Иное положение наблюдалось в Швеции: здесь в 1825 г. был основан Технологический институт, который подобно Берлинской технической школе и Петербургскому практическому технологическому институту в сущности был ремесленным училищем, готовившим мастеров. Лишь в 1877 г. он получил права высшего учебного заведения.

В последней четверти XIX в. капиталистические отношения охватывают Японию. В 1880 г. в японской промышленности было занято 5,6% населения, в 1890 — 8,9%, а к 1900 г. — уже более 13%. Происходит освоение современной технологии, закладываются основы различных отраслей промышленности, начинает развиваться в стране техническое образование. В 1870 г. в Токио был основан технический колледж, который в 1886 г. вошел в состав Токийского университета; несколько раньше, в 1880 г., был основан Технологический институт; в 1901 г. открыты технические институты в Токио и Осаке. Преподаватели для технических школ были приглашены из США и европейских стран, студенты пользовались иностранными учебниками, которые частично были переведены на японский язык. До 1892 г. был выдан всего 441 диплом инженера-механика, инженера-строителя, кораблестроителя, электротехника, архитектора, горного инженера, инженера-технолога и инженера-металлурга.

НАУКА О МАШИНАХ В НАЧАЛЕ XX в.

Наука о машинах первых двух десятилетий XX в. представляет собой осторожные поиски решения некоторых задач механики машин, от учения Рело осталось лишь «самое существенное» — теория пар, над которой, впрочем, работали до него и одновременно с ним и которая отнюдь не была самой сильной стороной его учения. Виттенбауэр писал по поводу колебаний между математическими и описательными методами в прикладной механике: «...одно время переоценивали математические методы и недооценивали естественнo-исторический характер задачи, что можно показать на одном определенном примере. Существует одна отрасль механики, называемая кинематикой. Под этим названием понимают геометрическое исследование движения некоторой системы в пространстве по отношению к требуемому для этого времени, в особенности тех систем технической практики, которые называются приводами. К этим приводам относятся, между прочим, управляющие приборы, которые, как известно, ставят перед изобретателями и инженерами-конструкторами самые сложные задачи. Поэтому в 70—80-х годах XIX столетия с огромным напряжением ожидали развития кинематики машин. Однако ожидаемый успех не получился: кинематика, которой вначале так восхищались, стремилась отвечать не на те вопросы, которые ей ставила практика, и сегодня из-за этого взаимного непонимания прекрасная по своей методике наука оказалась несостоятельной перед нуждами техники. Почему так произошло? Совершенно ясно, что пропустили то обстоятельство, что в машинной технике имеют дело не с движущимися точками и плоскостями, а с весьма массивными телами, которые движутся не в фантазии исследователя, не требуя никакой тормозящей силы, а подчинены действию вполне реальных сил. Таким образом, ки-

нематике ставили вопросы, на которые она не могла ответить: полагали, что можно обойтись чистой математикой, и забыли, что движение машины является естественнo-научной задачей»¹.

В последней четверти XIX в. в немецкой технической школе проявилась тенденция отрицания роли математики в деле подготовки инженера, о которой мы уже упоминали. В первом десятилетии XX в. разрыв между теоретическими и прикладными знаниями не только не уменьшился, а, наоборот, постоянно нарастал. Бурное развитие техники требовало от инженера умения принимать быстрые решения, и техническая школа учила этому, не вдаваясь в дебри теоретического исследования вопроса, т. е. опять-таки «на глазок», только на более высоком техническом уровне. Получилась своеобразная «диалектика» развития технической школы: в начале XIX в. производственными предприятиями руководили практики, в середине века — ученые техники, а в начале XX в. техническая школа начала выпускать обученных практиков, обладающих минимумом технической культуры. Виттенбауэр пишет: «В те годы усилился отрыв технического исследования от математических методов; интерес в инженерных кругах к теоретическим работам пропал...» И далее: «Следует отметить, что область исследования технической механики подчиняется и моде... Теперь исследователи преимущественно занимаются вопросами динамики, обусловленными некоторыми вытекающими из практики задачами. К этим новейшим вопросам динамики мы относим движение махового колеса, уравнивание мисс, в особенности на корабельных машинах, движение полчка, все большую область колебаний, далее, ряд гидравлических вопросов и, наконец, самые современные — законы сопротивления воздуха и движения аэроплана. При исследовании всех этих вопросов становилось все яснее, что при помощи математики можно продвинуться лишь до определенных пределов»².

На развитие кинематики механизмов в первые годы XX в. определенное влияние оказали классическая французская кинематика и техническая кинематика Рело.

¹ F. Wittenbauer, Zukunft und Ziele der technischen Mechanik. Graz, 1911, S. 24.

² F. Wittenbauer, Zukunft und Ziele..., S. 26, 29.

В Парижской политехнической и специальных технических школах объем преподавания теоретических наук был чрезвычайно большим, времени для практических занятий почти не оставалось, в связи с этим и механика машин начала приобретать все более теоретическое содержание, а научная работа в области теории машин к концу века свелась к работам ряда геометров над проблемами кинематической геометрии и исследованиям в области теоретической кинематики с некоторым уклоном в сторону изучения структуры механизмов. Учебная литература развивалась лишь в направлении идей Понселе и Виллиса. В высшей школе обычно читались два курса: курс кинематики механизмов, излагавшийся в духе последователей Виллиса, и курс прикладной механики, включавший также описательный курс машин. Хотя «Теоретическая кинематика» Рело была переведена на французский язык через два года после выхода в свет немецкого издания, влияние ее на постановку преподавания теории механизмов в высшей школе и на исследовательскую работу в этом направлении было ничтожным.

В Политехнической школе в 1890—1900 гг. некоторое время читал теорию механизмов один из самых выдающихся математиков столетия, Анри Пуанкаре³. Отрицательно относясь к классификационным увлечениям современников, он в своих лекциях возвращается к принципам Монжа, излагает основы теории механизмов, а также вводит в курс элементы кинематической геометрии.

В понимании Пуанкаре научное творчество составляет род искусства. «Ученый, достойный этого имени, а в особенности геометр, — говорил он, — испытывает от своего произведения то же впечатление, что и художник;

³ Анри Пуанкаре (Henri Poincaré, 1854—1912) родился в Нанси, здесь же окончил среднюю школу. Его учитель математики отзывался о нем так: «В моем классе в Нанси есть какое-то математическое чудовище». В 1873 г. первым прошел по конкурсу в Политехническую школу, откуда перешел в Горную школу, получил звание горного инженера (1879) и затем защитил диссертацию на степень доктора математики. С 1881 г. читал в Сорбонне, где получил кафедру небесной механики. Член Парижской академии наук (1887). Работал в разных областях математики, механики, физики; один из основоположников топологии и теории относительности.

радость его так же велика и имеет ту же природу. Если бы я не писал для публики, влюбленной в науку, я не решился бы высказаться подобным образом, опасаясь недоверчивости профанов. Но здесь я могу сказать все, что думаю. Если мы трудимся, то это не столько для того, чтобы получить положительные результаты, к которым мы только и привязаны, как думает толпа, сколько для того, чтобы почувствовать некоторую эстетическую эмоцию и сообщить ее тем, кто способен оценить ее»⁴.

К восторженным словам Пуанкаре, который был действительно поэтом в науке и чтение сочинений которого действительно доставляет эстетическое наслаждение, в качестве антитезы можно добавить высказывание австрийского машиноведа Адама фон Бурга: «Слишком печальна разница между образцовым, может быть, немногим длинным, но зато естественным и ясным изложением Эйлера, который и наименее трудное умел сделать легким, и хотя менее длинным, но зато принужденным и тяжелым изложением некоторых новых ученых, которые самое легкое умеют делать трудным и непонятным» (сочинения самого Бурга отличались ясностью изложения и читались легко).

Во второй половине XIX в. французская техническая школа и технические науки переживали некоторый застой в своем развитии, чего отнюдь нельзя сказать о математике, которая в эти годы была представлена во Франции целым рядом первоклассных геометров, решивших многие важные вопросы кинематики механизмов. Так, Морис Леви исследовал вопросы структуры механизмов и предложил структурное уравнение. Теорией шарнирных механизмов занимался Леоте⁵. Он применил метод Чебышева к задаче о воспроизведении кривой любого вида с помощью некоторых участков шатуновых кривых. Леоте пользовался степенными и тригонометрическими рядами. Отдельные работы были посвящены теории инверсоров, в частности, Дарбу⁶ изучал

⁴ Цит. по кн.: P. Appell. Henri Poincaré. Paris, 1925, p. 113.

⁵ Анри Леоте (Henri Ch. V. Leaute, 1847—1916) — профессор механики в Политехнической школе (1895), член Парижской академии наук (1890).

⁶ Жан Гастон Дарбу (Jean Gaston Darboux, 1842—1917). Окончил Высшую нормальную школу. С 1881 г. — профессор высшей гео-

условия точного воспроизведения прямой линии. Дарбу работал также в области теоретической кинематики, исследовал движение с двумя степенями свободы и общий случай движения⁷. Он первым в 1879 г. применил теорию функций комплексного переменного к исследованию плоских шарнирных механизмов, показав, что теорию шарнирных четырехзвенников можно свести к теории плоской кубической кривой, вследствие чего среди шарнирных механизмов можно выделить:

1. Ромб, для которого кубическая кривая вырождается в прямые.

2. Параллелограмм и антипараллелограмм, для которых кубическая кривая расщепляется на прямую и коническое сечение.

3. Четырехзвенник, стороны которого неравны и для которого кубическая кривая имеет одну двойную точку.

4. Общий четырехзвенник, для которого кубическая кривая не имеет двойных точек.

Над исследованиями в области теории шарнирных механизмов работали также Бертран, Пикар, Нейбер, Филлипс и другие ученые⁸. Ими были в значительной степени развиты вопросы кинематической геометрии и примыкающие к ним проблемы теоретической кинематики. Меньше внимания обращалось на развитие теории механизмов, особенно ее прикладных вопросов, и лишь на рубеже столетий Кенигс⁹ опубликовал в «Comptes rendus» Парижской

метрии, с 1889 г. декан Парижского факультета наук. Член Парижской академии наук (1884) и ее неперемный секретарь (1900).

⁷ G. Koenigs. Leçons de cinématique. Paris, 1897, p. 352—389, Note de Darboux.

⁸ Жозеф Луи Бертран (Josef Louis Bertrand, 1822—1900) — профессор математики и физики в Коллеж де Франс, член Парижской академии наук. Шарль Эмиль Пикар (Charles Emile Picard, 1856—1941) — профессор Тулузского университета, затем Сорбонны, автор работ в области теории кривых. Жан Нейбер (Jean V. Neuberger, 1840—1926) — профессор Льежского университета, автор работ в области механического воспроизведения линий. Эдуард Филлипс (Eduard Phillips, 1858—1931) — главный горный инженер, член Парижской академии наук.

⁹ Габриэль Кенигс (Gabriel Koenigs, 1858—1931). Окончил Высшую нормальную школу. Доктор математики (1882). С 1883 г. читал механику сперва в Безансонском, затем в Тулузском университете. С 1886 г. профессор Сорбонны. Член Парижской академии наук (1918).

академии наук серию статей, посвященных общей теории механизмов.

Свои исследования Кенигс открывает предположением, что над развитием кинематики в XIX в. тяготели две идеи. Первая, что при постановке любого исследования требовалось, чтобы оно было основано на некоторой классификационной системе; вторая, что механизм является по самой своей сущности лишь средством для преобразования движения — ошибка, идущая еще от Монжа. По мнению Кенигса, всякая классификация механизмов нереальна из-за неясности их строения и возрастающей сложности объекта исследования. Поэтому прав был Рело, который анализ механизмов начал с определения их первичных составляющих. Однако Рело также допустил ошибку, рассматривая пары лишь с кинематической точки зрения, что приводит к понятию механизма как средства для преобразования или производства движения. «В действительности же механизм является не чем иным, как некоторым состоянием связей между сопротивляющимися телами, и движение, которое может или не может возникнуть, зависит от приложенных сил. Следовательно, теория механизмов представляет собой исследование связей в машинах»¹⁰. Выясняя затем понятие машины, Кенигс устанавливает, что «всякая машина состоит из некоторой совокупности материальных сопротивляющихся тел, подверженных взаимным связям, на которые понуждают действовать силы природы в целях получения желаемого эффекта; последний может быть состоянием покоя или состоянием движения».

Итак, следует отличать в составе машины два совершенно различных элемента. Это, во-первых, совокупность тел, которые ее составляют, а также система связей, установленных между ними; это то, что составляет механизм. Во-вторых, это силы, которые понуждают действовать на механизм. Природа и распределение этих сил в сущности и определяют машину так, что один и тот же механизм может породить столько машин, сколько существует различных систем сил, которые можно приложить к нему»¹¹.

¹⁰ F. Koenigs. Etude critique sur la théorie générale des mécanismes. — «Comptes Rendus de l'Académie des sciences», 1901, t. 133, p. 385.

¹¹ G. Koenigs. Etude critique... Esquisse d'une théorie générale des mécanismes, p. 432—434.

К понятию пары Кенигс приходит несколько иным путем, чем Рело: «Положения, которые могут принимать два твердых тела одно относительно другого, зависят от шести параметров. Если ограничить эти положения определенными условиями, то тем самым сузится поле изменения этих шести параметров; так определяется то, что мы называем бинарной системой.

Если выразить ограничительные условия при помощи $(6-k)$ конечных уравнений между шестью параметрами, то относительные положения обоих тел будут зависеть только от k параметров; бинарная система имеет k степеней свободы.

Однако концепция бинарной системы является чисто абстрактной и не зависит от того способа, при помощи которого физически реализуется бинарная система, необходимая для создания привода. Если между двумя телами A и B создать кинематическую пару, то эти тела уже тем самым образуют бинарную систему. Но обратное неверно: только очень редко удастся воспроизвести бинарную систему при помощи простой пары элементов. Для этого требуется выполнение трех условий.

1. Совокупность условий, аналитически представляющих бинарную систему, должна быть эквивалентной системе уравнений, выражающих контакт некоторых поверхностей $S, S_1, S_2, \dots$, связанных с телом A , с другими поверхностями $s, s_1, s_2, \dots$, связанными с телом B .

2. При выполнении этой совокупности условий указанные поверхности, физически выполненные, должны войти между собой в контакт, что не всегда возможно, например, если бы речь шла о контакте между гиперболоидом и плоскостью.

3. Наконец, если два первых условия удовлетворены и тела A и B установлены в относительном положении, причем между ними обеспечен требуемый контакт, система не должна получить никакого относительного движения, которое могло бы прекратить осуществленный контакт и разложить таким образом пару»¹².

При этом Кенигс делает два замечания. Первое условие предполагает только геометрический контакт. Следовательно, трение как возможная причина связи не рас-

сматривается. Более того, введение в рассмотрение трения уже переводит механизм в машину. Второе замечание относится к третьему условию. Оба тела, находящиеся в соприкосновении, могут допускать бесконечно малые двусторонние смещения, не прерывающие контакта. Примером могут служить винт и гайка. Однако существует и иной тип соприкосновения, когда возможно бесконечно малое смещение только в одном направлении и когда, таким образом, прерывается контакт. Рельс и колесо, служащие примером, вступают в противоречие с третьим условием, поэтому его приходится несколько ослабить, предположив, что и в этом случае контакт остается. Так Кенигс приходит к понятию силового замыкания пары.

Исследовав понятие кинематической пары, Кенигс переходит к рассмотрению кинематических цепей. Он пытается установить принципы их структуры и вводит для этого понятие вторичной цепи, под которым понимает цепь, полученную из первичной кинематической цепи после удаления нескольких звеньев, если при этой операции она сохраняет все признаки кинематической цепи. Затем он вводит понятия автономной и связанной вторичных цепей. Автономной является такая цепь, которая не изменяет своего функционирования независимо от того, взята ли она в составе первичной цепи или выделена из нее. Если же внешние по отношению к автономной цепи звенья первичной цепи изменяют состояние ее подвижности внутри первичной цепи, то она называется связанной. «Автономные вторичные цепи представляют интерес с точки зрения анализа и разложения цепи. Следует стараться разложить цепь на вторичные автономные цепи, индивидуальное функционирование которых можно изучить независимо от остальных звеньев.

Члены полной цепи, не включенные в состав автономных цепей, на которые она разложена, служат органами связи, или соединителями, различных автономных цепей, их роль заключается в установлении внутренних связей между цепями. Иногда эту связь можно получить при помощи пары элементов, установленной между членами, принадлежащими к двум автономным вторичным цепям.

Во всяком случае, поскольку разложение можно произвести различными способами, функция органа связи, приданная одному из органов, не является абсолютной и подчинена способу разложения. Отсюда видно, насколько

¹² G. Koenigs. Etude critique... Les systèmes binaires et les couples d'éléments cinématiques, p. 483.

неглубокой была бы классификация, основанная на природе этих связующих звеньев.

С другой стороны, мы можем рассматривать всякую кинематическую цепь как реализующую управление бинарной системой, образованной двумя из ее членов, например A и B .

Но обычно вся совокупность членов цепи не принимает участия в управлении, поэтому исключение определенных членов не влияет на бинарную систему (A , B). Таким образом, из полной цепи можно исключать ряд членов до тех пор, пока не останется цепь, исключение любого члена из которой уже изменит рассматриваемую бинарную систему. О такой вторичной цепи мы говорим, что она связана с бинарной системой (A , B).

Заметим, наконец, что многие различные цепи могут быть подобным образом связаны с одной и той же бинарной системой. Они образуют эквивалентные управления этой системой»¹³.

Рассмотренные выше основные положения теории механизмов Кенигса охватывают учение о кинематических парах и принципы структурного анализа механизмов. Часть этого исследования, посвященная кинематическим парам, была полностью перекрыта результатами П. О. Сомова и Х. И. Гохмана, которые разработали эту теорию гораздо глубже, не говоря уже о том, что их работы были опубликованы значительно раньше публикаций Кенигса. Структурный анализ был задуман Кенигсом очень интересно и мог бы дать весьма плодотворные результаты, но, к сожалению, идеи его не получили развития и оказались основательно забытыми, хотя знакомство с ними было бы небесполезным и для современной науки о машинах и механизмах. И все же работа Кенигса была самым интересным явлением во французской кинематике и, пожалуй, единственной французской попыткой создать учение о механизмах на новых основаниях.

В 1895 г. была опубликована работа Кенигса, посвященная вопросу о воспроизведении любой алгебраической поверхности при помощи шарнирной системы¹⁴. В этой

работе Кенигс доказывает теорему, сформулированную Сильвестром без доказательства. Кенигс доказывает возможность построения механизма, который сможет описать по частям требуемую поверхность. Он указывает также на возможность формулировки подобной теоремы для кривой двойкой кривизны.

В заключение Кенигс пишет: «Изложенный метод дает возможность указать на верхний предел числа шарниров, которое требуется для воспроизведения поверхности или заданной кривой. Очевидно, однако, что возможны и упрощения. Предсказание этих упрощений является трудной задачей, решить которую и не пытались даже для случая плоских алгебраических кривых. Все же по этому поводу Кемпе уже давно доказал возможность их воспроизведения при помощи шарнирной системы»¹⁵.

Кенигс не остановился на этом и в следующем сообщении¹⁶ доказал, что с помощью шарнирной системы можно воспроизвести любую алгебраическую связь, наложенную на движение тела.

Книга Кенигса «Лекции кинематики» представляет собой обработку лекций, прочитанных автором в Высшей нормальной школе и на Парижском факультете наук. Она охватывает полный курс теоретической кинематики; из прикладной кинематики рассмотрены только шарнирные системы (глава XIII, стр. 243—307).

Глава, посвященная шарнирным механизмам, начинается с краткой истории вопроса. Кенигс указывает, что теория шарнирных механизмов является естественным переходом от теоретической кинематики к общей теории механизмов. Исследование он начинает с шарнирного четырехзвенника, определяет условия существования кривошипа, затем исследует шарнирные преобразователи (пантограф и различные типы инверсоров). Вопросы точного и приближенного воспроизведения прямой линии Кенигс рассматривает в историческом аспекте. Затем он переходит к движениям и преобразованиям, которые можно получить при помощи одной и той же шарнирной системы, рассматривает приложение шарнирных систем к решению

¹³ G. Koenigs. Etude critique... Sur les chaines secondaires, p. 621—624.

¹⁴ G. Koenigs. Toute surface algébrique peut être décrite par le moyen d'un système articulé.—CR, 1895, t. 120, p. 861—863.

¹⁵ Там же, с. 863.

¹⁶ G. Koenigs. Toute condition algébrique imposée au mouvement d'un corps est réalisée par le moyen d'un système articulé.—Ibid., p. 981—983.

уравнений и к представлению функций. Он включил в курс также две теоремы, речь о которых была выше.

В заключение Кенигс указывает, что создание общей теории шарнирных систем является настоящей потребностью, но это дело будущего, ибо, несмотря на работы Чебышева и других геометров, остается еще много вопросов, требующих тщательного исследования.

Кенигс подходил к решению задач теории механизмов как теоретик. Нужно сказать, что на рубеже столетий выявились два совершенно различных подхода к решению задач теории механизмов. Один, теоретический, осуществляли математики: Чебышев, Сильвестер, П. О. Сомов, Гохман и тот же Кенигс. Второй подход, если можно так выразиться, от машиностроения, был присущ главным образом ученым «немецкой» школы: немцам, австрийцам, швейцарцам; лидером этого направления, несомненно, является Рело. Несмотря на то что работа Рело была подвергнута суровой и не всегда справедливой критике, его идеи постепенно распространялись и к концу века часть их — учение о кинематических парах и цепях и учение о механизме и его преобразованиях — уже прочно вошла в обязательный багаж преподавателей прикладной механики. Были поставлены и некоторые задачи синтеза механизмов: точный и приближенный аналитический метод Чебышева, структурный метод Чебышева, Грасгофа и Грюблера, типовый метод Рело и метрический метод Бурмистера. Сам Рело упорно работал над развитием своих теорий и в 1900 г. выпустил в свет второй том «Теоретической кинематики».

Было бы не совсем точным называть сочинение продолжением первого тома. В значительной своей части это переработанное и дополненное переиздание первого тома, «сдобренное» большим числом полемических высказываний автора. Книга состоит из трех неравных частей. Первая часть (27 параграфов) посвящена кинематической геометрии, или, как ее называет Рело, форономии, вторая — учению о принужденном движении, или собственно теории механизмов, третья — кинематике в животном мире.

Предмет науки Рело определяет следующим образом: «Кинематика, или учение о принужденном движении, является... той частью механики, которая учит, как устроена машина или как ее следует устроить, чтобы движения,

возникающие в ней под действием внешних сил, были определены относительно всех своих путей»¹⁷.

Исследование опять начинается с элементарных пар, но подход к ним иной: Рело обобщает свои положения, высказанные ранее. Теперь он утверждает, что в состав кинематических пар входят элементы жесткие, а также элементы, сопротивляющиеся на растяжение, и элементы, сопротивляющиеся на сжатие. Обозначая эти элементы соответственно цифрами 1, 2, 3, получим следующие возможные соединения элементов в кинематические пары:

1 с 1	1 с 2	1 с 3
2 с 2	2 с 3	
3 с 3		

Из этих шести видов элементарных пар и состоят все машины. Рело считает, что исполнительный орган машины также вступает в кинематическую пару с обрабатываемым или переносимым объектом.

Примеры пар:

- 1 с 2 — барабан с обегаяющим его кантом,
- 2 с 2 — свивание вместе двух нитей,
- 2 с 3 — порода на ленте транспортера,
- 3 с 3 — пар и вода в инжекторе.

«Механизмом,— пишет Рело,— называется механическое приспособление из трех или большего числа частей, обладающих взаимной подвижностью и устроенных так, что при закреплении одной из них пути и скорости всех других имеют определенные значения»¹⁸.

Прежде чем перейти к определению машины, Рело возвращается к той дискуссии, которая проходила в конце 70-х годов. Разобрав свой спор с Беком, он уточняет различие между понятиями механизма и машины и несколько видоизменяет свое первоначальное определение: «Машина является соединением сопротивляющихся тел, которые устроены так, что с их помощью механические силы природы побуждаются выполнять при определенных движениях определенные действия»¹⁹.

¹⁷ F. Reuleaux. Lehrbuch der Kinematik, Bd. II. Die praktischen Beziehungen der Kinematik zu Geometrie und Mechanik. Braunschweig, 1900, S. 152.

¹⁸ F. Reuleaux. Lehrbuch der Kinematik, Bd. II, S. 187.

¹⁹ Там же, с. 247.

После дискуссии между Рело, с одной стороны, и Риттершаусом и Беком — с другой, со статьей на ту же тему выступает Гартиг²⁰. Стремясь уточнить понятие механизма, машины и привода, он детально проанализировал историю вопроса и пришел к выводу, что эти понятия определяются не только реальным составом объектов, но и их отношением к производственному процессу. Разбирая пример с тачкой, которую, как известно, Вейсбах считал возможным отнести к машинам, Гартиг пишет²¹, что пустая тачка является механизмом, если находится в состоянии покоя. Если же рабочий двигает тачку, то она является приводом (Getriebe). А если рабочий везет тачку, наполненную землей, то она является машиной. Естественно, такие казуистические ухищрения ничего пояснить не могли. Поэтому Рело, доказывая правильность и точность своих определений, не видел необходимости увеличивать число понятий. Он считал, что понятие привода (Getriebe) тождественно понятию механизма и исходя из этого предложил принятое теперь в немецком языке наименование науки о механизмах — Getriebelehre.

Разложение машины на механизмы, кинематические цепи и пары, т. е. то, что мы сейчас называем структурным анализом, Рело назвал элементарным анализом. Кроме того, по его мнению, машину следует рассматривать еще с двух точек зрения: с точки зрения ее построения из физических тел (Bau-Analyse) и с точки зрения применения составляющих ее механизмов (Getriebe-Analyse). «Анализ построения показывает, как члены кинематической цепи сами в свою очередь составляются из кинематических групп с помощью так называемого излишнего замыкания цепи. Сам по себе анализ построения является основной частью учения о конструировании, или о построении машин, а также во многих случаях и инженерно-строительного дела. Кинематический анализ построения все в большей и большей степени включается в число предметов, необходимых для инженера-строителя. Следует еще раз

²⁰ Эрнст Карл Гартиг (Ernst Karl Hartig, 1836—1900). Окончил Дрезденский политехникум. С 1862 г. там же ассистент, с 1865 г. профессор механической технологии. Первый ректор Дрезденской высшей технической школы (1890). С 1877 г. сотрудничал в Немецком патентном бюро.

²¹ E. Hartig. Über einige Allgemeinbegriffe der mechanischen Technik. — «Civilingenieur», 1894, Bd. XXX, S. 440.

подчеркнуть, что в результате такого анализа уясняется роль поршня и подвесок, которые до сих пор не имели определенного места среди деталей машин. Их помещали в самые различные разделы. Наш анализ показал, что они являются элементами, связывающими твердые и нетвердые звенья; поршни связывают элементы, сопротивляющиеся сжатию, с жесткими элементами; подвески, крюки связывают жесткие звенья со звеньями, сопротивляющимися сжатию»²².

Третий род анализа — анализ привода — составляет, по мнению Рело, сущность прикладной кинематики. Он дает возможность распределить механизмы по четырем группам, с точки зрения их применения в машинах. Такими четырьмя группами «назначения» являются: направление (Leitung), сохранение (Haltung), привод (Treibung) и формообразование (Gestaltung). Одинаковые по структуре механизмы могут быть использованы в машинах разного назначения. Задача «направления» в сущности совпадает с основной проблемой кинематики «по Монжу» и представляет собой преобразование некоторой ведущей кривой в требуемую ведомую. К таким механизмам относятся, в частности, механизмы для черчения кривых, инверсоры и др.

«Под названием «сохранения» я понимаю в настоящем исследовании механическое приспособление, которое предназначено для накопления и выдачи в течение некоторого времени работы»²³. В качестве примера такого динамического «конденсатора» можно привести маховое колесо. К этому же типу Рело относит различные ресиверы для жидкостей и газов, плотины и устройства для запруды в каналах, электрические и гидравлические аккумуляторы.

Рассматривая третью группу механизмов — привод, Рело отмечает, что следует различать преобразование движения, которым занимаются механизмы первой группы, и передачу движения, которую он считает важнейшей целью. Характерно, пишет он далее, что механизмов для передачи движения немного и все их можно разделить на пять групп: винтовые, шарнирно-звеньевые, колесные передачи, передачи по кривым (кулачковые механизмы), остановки. К ним следует добавить еще группу гибких

²² F. Reuleaux. Lehrbuch der Kinematik, Bd. II, S. 715.

²³ Там же, S. 347.

передач. Задачей прикладной кинематики является детальное и основательное изучение этих разновидностей механизмов. Такое распределение механизмов по типам на основе принципа единства их исследования применяется некоторыми учеными до настоящего времени.

К четвертой группе относятся механизмы, назначением которых является формообразование. Рело считает неправильным, что формообразование целиком отдано технологии; по его мнению, оно должно составлять часть прикладной механики. Механическая технология не может решить этой проблемы. «Наоборот, наши кинематические исследования дают возможность полностью охватить задачу. Прежде всего они выражаются в теории «инструмента», которая приводит к простому предложению, гласящему, что таковой является или кинематическим элементом, или членом кинематической цепи и, что то же самое, относится также к «обрабатываемому материалу», так что оба они образуют элементарную кинематическую пару. Отсюда непосредственно следует, что поскольку имеется лишь три возможных рода элементов — твердые, сопротивляющиеся растяжению и сопротивляющиеся сжатию, то их взаимодействия составят трижды три, или всего девять, возможных типов пар между инструментом и материалом»²⁴.

В сущности говоря, пара является формообразующим соединением двух звеньев, ибо благодаря явлениям трения поверхности пар прирабатываются. Иначе говоря, нет принципиальной разницы между парой как составящей кинематической цепи и парой между инструментом и материалом. Задачей машиностроителя является уменьшение мощности формообразования в парах первого типа и увеличение ее в парах второго типа.

Таким образом Рело предполагает создать кинематическую теорию машин-орудий, которая была бы логическим продолжением и завершением его кинематики. Действительно, любая машина на холостом ходу представляет собой разомкнутую кинематическую цепь большей или меньшей сложности. Включение машины на нагрузку является в таком случае замыканием кинематической цепи, и мы получаем структуру, которая принципиально ничем не отличается от какой-либо простой замкнутой цепи, например от шарнирного четырехзвенника. Представляется, что эта

²⁴ F. Reuleaux. Lehrbuch der Kinematik, Bd. II, S. 719.

идея Рело, высказанная им между прочим и не поддержанная дальнейшими исследованиями, заслуживает того, чтобы над ней задуматься: она полностью перекрывает кинематическую сущность машины. К сожалению, ни Рело, ни его ближайшие последователи не поддержали и не развили этой мысли: в течение следующих 20 лет машиноведы больше интересовались вопросами динамики и кинетостатики, чем кинематики.

Раздел второго тома, посвященный кинематике в животном мире, не был случайным. Если на протяжении трех четвертей века авторы руководств по прикладной механике стремились исследовать силу человека и животных как источник энергии, то к концу века в связи с ростом энерговооруженности человечества вопрос о человеке и животном как источнике физической силы полностью потерял свою актуальность. Наоборот, актуальность приобретает кинематика живого организма, поскольку капитализм на высшей стадии своего развития рассматривает работника как машину, от которой необходимо получить наибольшее полезное действие. Исследование Рело посвящено именно этому вопросу, но как большой ученый он и здесь ищет подтверждения своих идей и таким образом закладывает основы важного раздела теории механизмов, получившего развитие уже в наши дни в теории структуры манипуляторов и роботов.

Эти работы Рело послужили как бы катализатором для целого научного направления: уже в первые годы XX в. выходит серия работ Фишера, посвященных кинематике и динамике человеческого организма, из которых особенно заслуживают внимания две монографии²⁵.

Это направление, явившееся в сущности новой наукой, возникшей на стыке механики машин и физиологии, может служить одним из примеров характерной для XX в. интеграции наук.

Определенные результаты были получены также в области кинематической геометрии, учения о структуре механизмов и кинетостатики.

Больше других «повезло», пожалуй, кинематической геометрии, поскольку исследования в этой области ученые

²⁵ O. Fischer. Theoretische Grundlagen für eine Mechanik der lebenden Körper mit spezieller Anwendung auf den Menschen sowie auf einige Bewegungsvorgänge an Maschinen. Leipzig — Berlin, 1906; *idem*. Kinematik organischer Gelenke. Braunschweig, 1907.

не прерывали, следуя за модой. В частности, швейцарский математик Крелье, развивая идеи Маннгейма, исследовал шарнирные механизмы, предназначенные для механического воспроизведения кривых линий. Применяя методы кинематической геометрии к исследованию плоских кривых, Крелье нашел ряд соотношений и зависимостей между различными кривыми²⁶.

Значительное развитие кинематической геометрии принадлежит видному немецкому геометру Р. Мюллеру. Рейнгольд Мюллер (Reinhold Müller, 1857—1939) родился в Дрездене. Учился в Дрезденской высшей технической школе, сперва на строительном, а затем на педагогическом отделении, где слушал Бурместера. С 1887 по 1879 г. Р. Мюллер изучал в Лейпцигском университете математические науки. В 1883 г. по предложению Ф. Клейна ему была присвоена степень доктора философии. В следующем году он получил в Брауншвейгской технической школе кафедру начертательной геометрии, с 1907 г. заведовал кафедрой начертательной геометрии и кинематики в Дармштадтской высшей технической школе. В 1927 г. он вышел в отставку.

Первой темой исследований Мюллера в области кинематики была теория шатунных кривых шарнирного четырехзвенника. В четырех статьях, опубликованных в 1889—1901 гг., Мюллер исследовал двойные точки шатунных кривых четырехзвенника, а также один частный случай кривошипно-шатунного механизма. Продолжая это исследование, Мюллер изучил задачи, связанные с геометрическим синтезом шарнирного четырехзвенника. Он исследовал построение механизма по четырем и пяти бесконечно близким его положениям, вспомогательные кривые, служащие для построения механизма, и характерные точки, которые образуются при пересечении этих кривых,— точку Болла, являющуюся точкой пересечения кривой круговых точек с поворотным кругом, соответствующим данному положению системы, и точки, которые он назвал точками Бурместера и для которых доказал ряд теорем. В одном частном случае, когда точка Болла одновременно является точкой Бурместера, три остальные точки Бурместера лежат на одной прямой. Разыскивая соответствующий этому случаю шарнир-

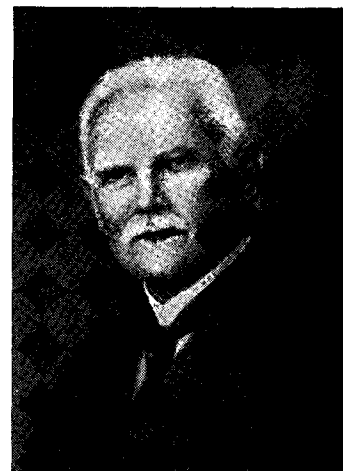
ный четырехзвенник, Мюллер решает задачу построения механизма для приближенного воспроизведения движения по прямой. Касательная к шатунной у кривой совпадает с ней в пяти бесконечно близких точках. Мюллер рассмотрел и случай, когда касательная к шатунной кривой совпадает с ней в шести точках,— предельный случай, так как сама шатунная кривая имеет шестой порядок.

Все эти работы Мюллера относятся к 90-м годам XIX в. Позже он обобщил свои результаты и свел их в одну книгу²⁷.

В конце первого десятилетия XX в. Мюллер занялся исследованием подобно-изменяемого движения. Он сформулировал следующую теорему: «Если три точки некоторой плоской подобно-изменяемой системы описывают окружности, то каждая четвертая ее точка воспроизводит шатунную кривую, т. е. такую кривую, которую описывает любая точка, связанная с шатуном шарнирного четырехзвенника». Таким образом, он установил связь между некоторыми подобно-изменяемыми системами и четырехзвенными механизмами. Этому вопросу он посвятил несколько мемуаров.

Характерной особенностью научного творчества Мюллера было то, что он подобно своему учителю Бурместеру, оставался геометром не только в математических, но и в механических работах.

Исследованиями в области кинематики плоского движения продолжали заниматься Мор и Бурместер. О. Мор в 1895 г. опубликовал в «Zeitschrift für Mathematic und Physik» статью, в которой описал применение своего метода планов скоростей к исследованию планетарных механиз-



Р. Мюллер

²⁶ L. Crelier. Systèmes cinématiques. Paris, 1911.

²⁷ R. Müller. Einführung in die theoretische Kinematik, insbesondere für Studierende des Maschinenbaues etc. Berlin, 1932.

мов. Дальнейшие свои изыскания в области кинематики плоского движения он опубликовал в двух статьях в 1903 и 1904 гг.²⁸ Здесь он одновременно с Виттенбауэром начал исследования в области динамики шарнирных механизмов. В 1906 г. основные исследования Мора в области технической механики были собраны в одной книге, изданной к его юбилею²⁹.

Бурместер продолжал исследования. В 1912 г. он предложил метод построения планов ускорений для плоских механизмов.

Идеи структурного анализа и синтеза механизмов развивались в трудах Грюблера, Виттенбауэра, Линена. Грюблер занимался структурным исследованием пространственных механизмов. В работе «Критерий принужденности для винтовых цепей», напечатанной в сборнике, посвященном восьмидесятилетию Мора³⁰, Грюблер определил соотношения между числом звеньев пространственного механизма и числом соединяющих их винтовых пар. Если через n обозначить число звеньев, а через s число винтовых пар, то условие принужденности движения кинематической цепи Грюблера для этого случая можно записать в виде

$$5s - 6n + 7 = 0.$$

Это условие удовлетворяется для элементарного случая одной винтовой пары, $s=1$, $n=2$, простейшим случаем будет семизвенный пространственный механизм при $s=7$; $n=7$. Если составить условие развития цепи принужденного движения в виде

$$s = 7 + 6\lambda; \quad n = 7 + 5\lambda$$

при λ , изменяющемся от 0 до ∞ , то сразу же получатся многозвенные пространственные цепи этого вида.

Грюблер распространил это условие также на цепи, в которых винтовые пары частично заменены поступательны-

ми. Для пространственных цепей, соединенных исключительно поступательными парами, оно уже теряет смысл. Свои исследования Грюблер опубликовал в известной монографии «Учение о приводе. Теория принужденного движения и плоских механизмов»³¹.

В первые десятилетия XX в. в Мюнхенской высшей технической школе курсы графической динамики распределительных механизмов и кинематики читал В. Линен³². Он разработал систематику плоских механизмов, сущность которой заключается в следующем: в зависимости от количества приводов шарнирные механизмы делятся на одно-, двух-, ..., n -кривошипные механизмы. Количество приводов можно уменьшить, если связать два кривошипа тягой. Поэтому следует различать механизмы со свободным и связанным построением; к первому виду относятся, например, шарнирный четырехзвенник (однокривошипный механизм) и шарнирный пятизвенник (двукривошипный механизм). Если оба кривошипа последнего связать тягой, то получится двукривошипный механизм в связанном исполнении.

Трехкривошипный механизм можно получить соединением одним звеном трех двухзвенных групп, вторые концы которых шарнирно связаны с основанием. Если затем связать кривошипы попарно тягами, то получится трехкривошипный механизм в связанном исполнении. Подобным образом можно получить четырех-, пяти- и n -кривошипные механизмы.

Дальнейшее построение механизмов производится подсоединением к ним двух- или трехпроводковых групп, аналогичных ассуровым, удалением отдельных звеньев или заменой звеньев на группы. Систематика Линена была опубликована в Германии в середине 20-х годов, и пользовались ею мало. Например, в «Графической динамике» Виттенбауэра, вышедшей в 1923 г., о ней даже не упоминается.

²⁸ O. Mohr. Beiträge zur Geometrie der Bewegung und zur Kinetik ebener Getriebe. — «Zeitschrift für Mathematik und Physik», 1903, Bd. 51, S. 393; 1904, Bd. 52, S. 29.

²⁹ O. Mohr. Abhandlungen aus dem Gebiete der technischen Mechanik. Berlin, 1906; 2-te Aufl., 1914.

³⁰ M. Grübler. Das Kriterium der Zwangläufigkeit der Schraubenketten. — Festschrift O. Mohr zum 80. Geburtstag. Berlin, 1916, S. 124.

³¹ M. Grübler. Getriebelehre. Eine Theorie des Zwanglaufes und der ebenen Mechanismen. Berlin, 1917.

³² Вильгельм Линен (Wilhelm Linen, 1861—1920) — профессор Мюнхенской высшей технической школы. Он не опубликовал своего курса и поэтому с его идеями в области структуры можно познакомиться лишь в работах его учеников Маркса и Прегера. Систематика Линена полностью укладывается в систематику Асура (см. ниже).

Кафедру Рело в Берлинской высшей технической школе унаследовал Вильгельм Гартман³³. Он пытался развить некоторые идеи Рело в области кинематики.

Вопросами структуры механизмов и их принужденного движения занимался и Виттенбауэр, который в своей монографии посвятил структурному анализу целую главу. Степенью подвижности какой-либо кинематической цепи Виттенбауэр называет число произвольно выбранных определителей, которые необходимы для установления скоростей точек цепи относительно покоящейся плоскости отсчета. Так как любое жесткое тело, движущееся в плоскости, имеет три степени свободы, то замкнутая кинематическая цепь в плоскости имеет $3+1=4$ степени свободы. Если в плоскости задана ферма, то при удалении из нее f внутренних звеньев число степеней свободы

$$x=3+f.$$

Пусть p — число жестких полигонов, не перекрывающих друг друга. Если обозначить через s число сторон, то $s=2p+1$ или $s-2p=0$. Следовательно,

$$f=s-2p-1 \text{ или } x=s-2p+2,$$

что для принужденного движения при $x=4$ и $f=1$ переходит в $s=2(p+1)$.

В самом общем виде кинематическая цепь состоит из звеньев, в том числе пересекающихся, и жестких треугольников. Пересекающиеся звенья следует удалить. Если обозначить буквой n число всех остающихся членов, K — число удаленных членов, π — число изменяющихся полигонов, то условие приобретет следующую форму:

$$x+k=n-2\pi+2.$$

Если цепь имеет только поступательные пары, то, обозначив через π_s число изменяющихся полигонов, получим $x=n-\pi_s+2$ или, положив $x=4$ для принужденного движения, $n=\pi_s+2$.

Для кинематических цепей, включающих поступательные и вращательные пары, Виттенбауэр и его ассистент инженер К. Кризо предложили несколько иной критерий³⁴ принужденности движения.

³³ Вильгельм Гартман (Wilhelm Hartmann, 1853—1922) — ассистент Рело, позже профессор кинематической геометрии в Берлинской высшей технической школе.

³⁴ F. Wittenbauer. Graphische Dynamik. Berlin, 1922, S. 238.

При графоаналитическом исследовании механизмов Виттенбауэр пользуется в основном методом ложного положения. Векторные уравнения он применяет только для определения ускорений точек механизма. По мнению Виттенбауэра, «при всем остроумии метода Мора его недостатком является то, что для каждой цепи подбирается иное разложение на движения, более соответствующее характеру цепи». Однако то же самое можно сказать и о методе самого Виттенбауэра: так как у него не было структурной систематики механизмов, то его кинематика являлась в основном все тем же сборником примеров.

Основная заслуга Виттенбауэра заключается в создании системы графических методов исследования динамики механизмов.

Фердинанд Виттенбауэр (Ferdinand Wittenbauer) родился в 1857 г. в Марбурге-на-Драу. Учился в Высшей технической школе в Граце, Венском политехническом институте и Берлинском университете, где слушал лекции Кирхгоффа и Вейерштрасса. С 1880 г. Виттенбауэр работал в Высшей технической школе в Граце, сначала приат-доцентом, а с 1891 г. — ординарным профессором теоретической и технической механики. В 1917 г. Немецкая высшая техническая школа в Праге присвоила ему степень доктора технических наук honoris causa.

До 1904 г. областью научных интересов Виттенбауэра была графическая кинематика. Приблизительно с 1905 г. его основные научные интересы перемещаются в область динамики. Он работает над графическим расчетом маховика, затем над некоторыми задачами графической статики механизмов и созданием кинестатики. Одновременно издает «Задачник по технической механике» в трех томах, ставший важнейшим пособием по курсу прикладной механики для студентов высших технических школ Германии и других стран. Основной труд Виттенбауэра, «Графическая динамика», вышел уже после его смерти. Умер Виттенбауэр в 1922 г.

Виттенбауэр был не только ученым, но и талантливым писателем и драматургом. Он написал несколько эпических произведений и драм, из которых наиболее известна пьеса «Приват-доцент» (1905).

Виттенбауэр в значительной степени продвинул создание точного метода расчета маховика. Тот метод, который был предложен Портером, а затем Радингером, не давал

достаточно точного решения вопроса. «Несмотря на введение действия сил инерции,— писал Виттенбауэр,— разрешение этого вопроса является динамическим лишь по виду. В настоящем динамическом решении следовало бы учесть полное влияние масс и скоростей без упрощающих отступлений, а вследствие того, что при обращении с движением обычно устраняют все неудобные переменные, динамический вопрос заменяется кинематическим или статическим и тем самым задача меняется».

Понятие о замещающих точках Виттенбауэр заимствовал от Грасгофа. В 1905 г. он опубликовал свой метод расчета маховика, который был основан на идеях Кориолиса и Грасгофа о приведенной массе и приведенной силе. В отличие от Кориолиса, предложившего сложный путь графического исследования уравнения массы, Виттенбауэр предложил использовать для расчета маховика диаграмму энергии и масс, каждая точка которой представляла собой состояние движения механизма.

В 1906 г. Мизес предложил применить к методу Виттенбауэра графическое интегрирование. Но, несмотря на это и иные улучшения, практическое применение метода Виттенбауэра давало погрешность не меньшую, чем метод касательных усилий: обеспечить точность необходимых графических построений оказалось невозможно.

Развитие динамики в начале первой четверти XX в. было связано с потребностями машиностроения, которое в эти годы в связи с появлением новых производств переживало период бурного роста. С появлением новых машин и новых технологических методов возникла необходимость в качественно новых, более точных методах расчета машин. А кроме того, как мы видели, расчеты деталей охватывали относительно небольшую их группу, правда весьма важную; большинство деталей, в том числе наиболее характерные для технологических машин, продолжали рассчитывать «по старинке»: по подобию или соображению.

Поэтому встал вопрос о науке, занимающейся технологическими машинами, которая и возникла в начале XX в. Ее создание связано было с новым подходом к решению задачи, которая оказалась не под силу отдельным ученым: потребовалась организация специальных учебных и заводских лабораторий, а также неизвестного до тех пор типа научного учреждения — научно-исследовательских инсти-

тутов. Потребовалась также координация усилий целого ряда наук, что стимулировало и их развитие, причем в направлении поисков решений «на стыке». Так возник оптический метод определения напряжений в деталях сложной формы, заложены основы применения теории функций комплексного переменного к различным задачам механики и техники, начали разрабатываться биомеханика, теория регулирования и т. п.

Следовательно, те решения задач теоретического машиностроения, которые предложили Прейль, Лоренц, Мор, Виттенбауэр и другие ученые, были лишь «первым приближением», причем не с точки зрения точности, а из-за ограниченности охвата исследуемого материала.

Одной из первых задач, решение которых было необходимо для инженеров-практиков, было определение сил, действующих в парах на отдельные детали машин или их группы (звенья). Наука о деталях машин давала методы их расчета, но не могла ответить на вопрос о том, как определяются силы, действующие на детали. Трудность заключалась в том, что силы, действующие между отдельными звеньями механизма, являются по отношению к всей машине внутренними и поэтому взаимно уничтожаются (по закону равенства действия и противодействия). Надо было найти такой метод, при котором внутренние силы не исключались бы, причем он должен был учитывать не только те силы, которые вызывали действие машины, но и те, которые образовывались в процессе движения машины, в частности силы вредного сопротивления и, главное, силы инерции. Но последние по своей величине пропорциональны ускорению, следовательно, прежде всего нужно было определить распределение ускорений в движущемся механизме. Этим объясняется, что и Мор, и Виттенбауэр особенное внимание обратили именно на графическое определение ускорений. Мор посвятил кинетостатике вторую часть «Движения плоских механизмов»³³. Он определяет силы, действующие на звенья механизма во время его движения, давления в парах без учета сил трения, давления в парах при учете сил трения, а также условие существования механизма. В работе «Графиче-

³³ O. Mohr. Abhandlungen etc., Abh. IV. Die Bewegung der ebenen Getriebe, T. 2. Die Kinetik ebener Getriebe, S. 104—186.

ская динамика механизмов»³⁶ Виттенбауэр обращает особое внимание на распределение масс и определение статических моментов и моментов инерции звеньев механизма.

Возник вопрос и о создании общего метода кинетостатического исследования, который был бы приемлемым для конструкторской практики. Для создания такого метода пробовали применить не только принцип Даламбера, но и уравнение Лагранжа, но безрезультатно. Как писал Лоренц, «все... динамические операции основывались на последовательном применении принципа потерянных сил Даламбера, который обеспечивал рассчитываемому и конструирующему инженеру преимущество непрерывной обозримости всех действий, что также сделало основы динамики особенно удобными для преподавания в высшей технической школе. Это следует подчеркнуть в особенности, ибо в последнее время стремятся приспособить для этого заимствованные из аналитической механики уравнения Лагранжа для каждой степени свободы движения... Основываясь на собственном опыте, я сомневаюсь, что этот весьма значительный в науке метод может прийти по вкусу большинству учащихся инженеров»³⁷.

«Графическая динамика» Ф. Виттенбауэра была для немецкой технической школы первым учебным пособием, в котором излагались методы кинетостатического и динамического расчета механизмов. В предисловии автор указывает, что «основанием для динамики служит кинематика, но не кинематика машин в смысле Рело, а учение о механизмах (Getriebelehre), т. е. учение о движении кинематических цепей»³⁸. Замечание это весьма характерно для немецкой науки первой четверти века, которая в это время старалась отмежеваться от Рело и вновь вспомнила о нем лишь в середине 20-х годов.

Виттенбауэр предлагает «ввести в инженерные круги графическую динамику подобно тому, как некоторое время тому назад была введена графостатика. Подобно графостатике, в значительной степени ограничившей расчеты статических сооружений и заменившей их графическими

определениями, будет поступать и графическая динамика в своей области. Но она пойдет и дальше — она должна не только быть приспособлена для целей инженера-машиностроителя, но вообще представлять плоское движение в графической форме и показывать, как и в области теоретической динамики можно решить поставленную задачу простейшим способом и почти без всяких расчетов»³⁹.

Замечание Виттенбауэра не лишено интереса. Графические методы не сразу были восприняты высшей технической школой и практикой машиностроения: на протяжении конца XIX и первых лет XX в. шла глухая борьба между «приемлющими» и «неприемлющими» графические методы (в этом можно убедиться, просмотрев хотя бы учебники по теории механизмов, немецкие, английские, французские, а также русские). В сущности, было и основание для «неприемлющих»: чуть ли не для каждой задачи требовалось придумывать способ ее графического решения, а некоторые задачи вообще выносились на страницы научных журналов⁴⁰. Лишь работы Ассура, как мы увидим ниже, обеспечили общий подход к решению задач кинематики и кинетостатики и поставили таким образом графические методы расчетов на почетное место в учебных курсах по теории механизмов, а также в конструкторской практике.

«Графическая динамика» Виттенбауэра состоит из двух неравных частей. Первая, большая (гл. I—XXVIII), часть посвящена исследованию мгновенных движений.

В двух вводных главах первой части Виттенбауэр исследует распределение скоростей и ускорений в подвижных системах тел. Оба раздела изложены весьма обстоятельно, но отсутствие общего метода теории структуры механизмов сказывается уже здесь (как и в остальных разделах книги). Это и не дает возможности построить общую теорию, из которой конкретные случаи вытекали бы в качестве ее частных приложений. Само изложение Виттенбауэра сводится, в сущности, к комментированию ряда примеров. Третья глава представляет собой сжатый

³⁶ F. Wittenbauer. Graphische dynamik der Getriebe.— «Zeitschrift für Mathematik und Physik», 1904, Bd. 52.

³⁷ H. Lorenz. Die Mechanik in ihrer Bedeutung für die Maschinenbau.— «Zeitschrift des VDI», 1906, Bd. L, S. 654.

³⁸ F. Wittenbauer. Graphische Dynamik, S. IV.

³⁹ F. Wittenbauer. Graphische Dynamik, S. V.

⁴⁰ Позже оказалось, что и первая четверть XX в. не явилась пределом в этом отношении. Еще в 40-х — начале 50-х годов в американских технических журналах печатались в качестве сообщений графические решения некоторых довольно элементарных задач.

очерк кинематической геометрии, сведений в котором дается меньше, чем, например, в известном учебнике Н. И. Мерцалова.

Далее Виттенбауэр рассматривает кинематику и динамику плоского движения, теорию замещающих точек (в сущности, основной метод динамики, которым он пользуется), определение сил, действующих на тело, в частности сил инерции, и зависимости их от распределения ускорений движущейся системы, приведение сил, действующих на систему. Несколько особняком стоит содержание XV главы, посвященной принужденному движению кинематических цепей. В некоторой степени оно использовано в следующих главах, где рассматривается графическое определение скоростей и ускорений для цепей, соединенных шарнирами, поступательными и высшими парами. В первой же части Виттенбауэр исследует статику и динамику механизмов и определение силовых воздействий в кинематических парах. В последнем случае он пользуется методом разнесения пар по шарнирам исследуемого механизма, предложенным им еще в 1906 г.⁴¹

Основным содержанием второй части книги — «Движение во времени» — является изучение кинематических и динамических характеристик движения при помощи графиков и диаграмм, многие из которых предложены автором. К этой части примыкают две главы о применении описанных методов — исследование динамики двухтактно-го двигателя и динамики маховика.

«Графическая динамика» Виттенбауэра является синтетическим трудом. В ней обобщены результаты самого автора, а также О. Мора, Хойна⁴², Шёнфлисса⁴³, Альеви и ряда

⁴¹ F. Wittenbauer. Dynamische Kraftpläne. — «Zeitschrift für Mathematik und Physik», 1906, Bd. 54.

⁴² Карл Хойн (Karl Heun, 1859—1929). Учился в Галльском и Гёттингенском университетах; в 1921 г. получил степень инженера-доктора в Дармштадтской высшей технической школе. Работы Хойна содержат многочисленные исторические справки.

⁴³ Шёнфлисс (Arthur Schoenflies, 1853—1928). Учился в Берлинском университете (1870—1875), преподавал в гимназиях. В 1884 г. защитил в Гёттингенском университете диссертацию, с 1892 г. там же читал прикладную механику. Преподавал также в Кёнигсбергском и Франкфуртском университетах. В своей основной работе — «Геометрия движения в синтетическом представлении» («Geometrie der Bewegung in synthetischer Darstellung», 1886) — собрал теоремы плоской и пространственной кинематической геометрии.

других ученых. Но историческое значение ее велико, так как она представляет своего рода грань между двумя периодами в истории науки — заканчивает собой период «пренебрежения» прикладной механикой и начинает новый период глубоких и остроумных исследований, характерных для второй четверти XX в.

Работа над созданием и развитием теории механизмов и машин проводилась главным образом в стенах высших учебных заведений. Поэтому ее содержание, объем исследуемого материала и формы исследования определялись научным уровнем и требованиями педагогического процесса. Не без влияния Рело возникли повсеместно кабинеты прикладной механики, важное место в которых занимали коллекции кинематических моделей (опять-таки «по Рело»). Впрочем, до постановки экспериментальных исследований машин, за небольшим и незначительным исключением, пока еще дело не доходило.

Сложной оказывалась зависимость исследований в области теоретического машиностроения от технического уровня страны. Так, Россия, значительно уступавшая в своем промышленном развитии передовым капиталистическим странам, имела ряд превосходных технических школ и в некоторых направлениях теории механизмов значительно опередила своих «соседей». Несомненно, однако, что характерные особенности национальных систем профессионального образования, их достоинства и недостатки отражались на направлении и содержании научных исследований, проводившихся в стенах технических школ, а тем более на программах преподаваемых дисциплин и методах преподавания. В полной мере это относится и к теории механизмов и машин, поэтому не лишено интереса краткое обозрение положения высших технических школ в наиболее развитых капиталистических странах.

К началу XX в. сеть высшего технического образования в Германии составляли десять высших технических школ, из которых самыми сильными были Берлинская и Мюнхенская, и два высших горных училища, в Фрайберге и Клаустале. В 1870 г. в этих школах обучалось более 3 тыс. человек, в начале XX в. — около 12 тыс. Преподаватели высших технических школ были высококвалифицированными, педагогической работой перегружены не были, поэтому имели возможность уделять достаточно время исследовательской деятельности. Высшие техни-

ческие школы были хорошо оборудованы, имели лаборатории и технические кабинеты; средняя школа обеспечивала высшую школу подготовленным контингентом студентов. Все это давало технической школе возможность выпускать инженеров с хорошей теоретической и практической подготовкой.

Совершенно иными были установки французской высшей технической школы. Она давала общее образование, глубокое знание математики и теоретических основ наук. Но недостатками ее были отрыв от практики, недооценка роли приложений. К тому же средством общения между профессорами и студентами в основном была лишь лекция. В этих условиях курс прикладной механики правильнее было бы назвать приложением теоретической механики к некоторым задачам техники. Более специальные его разделы были объединены под названием «индустриальной механики» с полуописательным-полурасчетным методом изложения.

Так, профессор Политехнической школы академик Леон Лекорню⁴⁴ писал в своем «Курсе механики»: «Есть ли смысл, как иногда считают, увеличивать раздел прикладной механики за счет механики рациональной? Поступать так было бы не понимать действительного значения политехнического образования... кроме того, в чрезмерном развитии технической части было бы больше неудобств, чем преимуществ. Следовало бы придерживаться общих методов, не загромождая память учащихся слишком частными деталями, лишенными воспитательного значения, деталями, которые следует предоставить специальным школам и которые, более того, можно было бы найти, когда это понадобится, в специальных трудах, тогда как учащиеся уже не получат возможность проникнуть в самые принципы науки...»⁴⁵

Что же относит Лекорню к «принципам науки», которые нужно сообщить каждому будущему инженеру? Вто-

⁴⁴ Леон Лекорню (Léon-François Alfred Lecornu, 1854—1940). Окончил в 1872 г. Политехническую школу. Работал инженером в инспекции железных дорог, затем главным горным инспектором. Был профессором механики Горной и Политехнической школ (1900—1924), Высшей авиационной школы (1924—1934). Член Парижской академии наук (1910), ее президент (1930). Работал в области теории регуляторов, теории зацеплений и в других областях теоретической и прикладной механики.

⁴⁵ L. Lecornu. Cours de Mécanique, t. I. Paris, 1914, p. VI.

рая глава его курса называется «Применение кинематики к механизмам». При изложении кинематики механизмов Лекорню пользуется классификацией Виллиса и строго ее придерживается (о теориях Рело и других ученых конца XIX — начала XX в. он не упоминает). От школы Монжа осталось лишь определение механизма: механизм представляет собой приспособление для преобразования движения между двигателем и орудием. Изложение очень элементарно и носит почти исключительно описательный характер, а незначительные «строгие теоретические рассуждения» зачастую совершенно ошибочны. Так, излагая преимущества эвольвентного зацепления, Лекорню пишет: «Другое замечательное свойство его состоит в том, что износ зубца существенно не изменяет характера, ибо если предположить, что зубец изнашивается везде с одинаковой скоростью, то его контур, образованный двумя отрезками эвольвент, будет заменен иным, образованным кривыми, параллельными первоначальным. Мы знаем, однако, что кривая, параллельная эвольвенте, также является эвольвентой. Зацепление ослабляется и образует большие зазоры, но продолжает обеспечивать постоянное отношение угловых скоростей; впрочем, можно уменьшить зазоры, сблизив оси обоих колес»⁴⁶. На чертеже изображен заостренный зубец «треугольной формы», пунктиром показан «изношенный» зубец.

Очень элементарно и на весьма невысоком научном уровне описывает Лекорню также парные механизмы, кулачки и эксцентрики, гибкие передачи, фрикционные механизмы. В большинстве случаев он ограничивается схематическим изображением механизма и кратким его описанием. Подробнее описаны механизмы 3-го класса 2-го рода по Виллису, т. е. кривошипно-ползунные механизмы. Лекорню излагает их аналитическую теорию.

Никаких общих методов исследования, уже вошедших в учебную литературу, и в частности графических методов анализа механизмов, Лекорню не описывает. Седьмую главу он посвящает статике машин и излагает в ней в основном элементы теории трения.

Теории машин Лекорню посвящает несколько более 200 страниц⁴⁷, из которых около половины отводит на ди-

⁴⁶ L. Lecornu. Cours de Mécanique, t. I, p. 117.

⁴⁷ L. Lecornu. Cours de Mécanique, t. III. Paris, 1918, p. 429—634.

намику, а в остальной части излагает теорию гидравлических термо-машин. Для уравнивания движения машины он вводит понятие движущего момента и момента сил сопротивления: «Под названием движущей пары или движущего момента понимают такое количество M , что $Md\theta$ является работой движущих сил, соответствующей элементарному вращению $d\theta$. Аналогично момент сопротивления R определяется тем условием, что $Rd\theta$ является элементарной работой сопротивления»⁴⁸.

Исходя из этого Лекорню представляет теорему живых сил для машины в форме

$$1/2 \alpha \{A + \int (\theta) \omega^2\} = (M - R) d\theta.$$

И в этой части своего сочинения Лекорню не пользуется графическими методами и избегает геометрических построений.

В других курсах прикладной механики (например, в курсе П. Пенлеве) вопросы теории механизмов и машин исследуются глубже, иногда целые разделы посвящены кинематической геометрии, но очень мало интереса проявляется к прикладной механике как теории машиностроения: эта отрасль науки во Франции в начале XX в. практически не развивалась.

Английская система высшего технического образования оформилась, в сущности, лишь к середине первого десятилетия XX в. Основным принципом ее, развившимся исторически, было обучение без отрыва от производства. Старые университеты имели по одной, в лучшем случае по несколько технических кафедр, шесть новых, основанных в 1900—1909 гг. (в том числе университеты в Бирмингеме, Лидсе и Шеффилде, организованные на базе технических колледжей), были в этом отношении в более благоприятном положении. В 1907 г. Королевский колледж наук, Королевская горная школа и Лондонский городской инженерный колледж слились в Имперский колледж науки и техники, вошедший в 1908 г. в состав Лондонского университета, и таким образом Лондон стал главным учебным центром по техническим наукам.

Лондонский университет, основанный в 1834 г., был сперва лишь чем-то вроде экзаменационной комиссии, при-

сваивавшей степени и звания. В 1900 г. он был преобразован в обычный университет, и в нем наряду с физико-математическим, юридическим и прочими был открыт также инженерный факультет. В конце первого десятилетия XX в. функции университета были расширены — он стал органом, контролирующим все высшее образование в пределах Лондона. К 1915 г. в его состав входили три колледжа — Университетский, Королевский и Королевский женский, а также 31 университетская школа (schools of the University), в том числе Имперский колледж науки и техники (Imperial College of Science and Technology). В 30 других лондонских высших школах работали «признанные» университетом преподаватели (recognised teachers).

Таким образом, другой характерной чертой английской системы образования было объединение научного и технического образования под одной крышей. Это отразилось и на учебной литературе, в частности по прикладной механике: учебники состоят из небольших разделов с минимумом теоретических сведений, но с большим числом примеров и задач. На учебной литературе отразилось также и характерное для английской научной школы изучение шарнирных механизмов, особенно механизмов для воспроизведения прямой линии, окружности и иных кривых линий. Деятельное участие в создании графических методов принимали Смит и Кеннеди. К началу века относятся работы Беннета⁴⁹, который, продолжая исследования английских математиков в области теории шарнирных механизмов, распространил их на случай движения в пространстве и показал возможность построения шарнирного четырехзвенника с непараллельными и непересекающимися осями шарниров.

В качестве примера английского учебника можно привести курс «Теории машин» Мак Кея, прочитанный в Имперском колледже науки и техники. Он состоял из трех частей: общего курса механики, кинематики машин и динамики машин. Автор пользуется как классификацией Виллиса, так и теорией Рело, хотя и пишет, что «концепция Рело очень полезна при исследовании простых кинематических цепей, но не особенно помогает в более сложных

⁴⁹ Джоффруа Томас Беннет (Geoffrey Thomas Bennet, 1868—1943) — математик. Преподавал в Кембриджском университете. Известны его работы в области теории механизмов и машин (1903—1922).

⁴⁸ L. Lecornu. Cours de Mécanique, t. III, p. 436.

случаях, Отдельную главу Мак Кей посвящает «синтезу машин», где излагает основы учения о кинематических цепях. В третьей части автор рассматривает учение о трении, статику машин, элементы динамики (диаграмму вращательных моментов), учение о регуляторах и об уравнивании машин⁵⁰.

Остается сказать еще о положении прикладной механики в США. К концу века число технических учебных заведений в США резко увеличилось и составило в 1899 г. 89, а в 1908 г. — 118. Но по количеству учащихся они были небольшими: лишь два из них, в том числе Массачусетский технологический институт, имели более 1000 слушателей, в 31 школе было от 200 до 500 слушателей, а в остальных — меньше 200. Научный уровень преподавания был невысоким, основное внимание уделялось практической подготовке учащихся.

Первые два десятилетия XX в. не были особенно благоприятны для развития в США физико-математических наук вообще. А такая наука, как теория механизмов и машин, находившаяся «на стыке» между математическими и техническими науками, совершенно выпала из поля зрения исследователей. Изучали механику машин по старым учебникам или компилированным новым, по качеству не отличавшихся от старых. В первом издании наиболее распространенного в это время американского учебника по прикладной механике «Элементы механизмов» Швамба и Марриля⁵¹ об ускорении упоминалось только однажды, между прочим (на стр. 4). Скорости звеньев шарнирных механизмов определялись ортогональными составляющими, переносимыми от звена к звену. Мгновенные центры вращения применялись для определения скоростей различных точек одного и того же звена.

В третьем издании, опубликованном в 1921 г., определялись линейные и угловые ускорения, но без всякого анализа. Четвертое издание (1930) не имело существенных изменений по сравнению с предыдущим. В пятом издании

(1938) был улучшен анализ скоростей и добавлен анализ ускорений⁵².

Таким образом, первая промышленная держава мира, имевшая самое передовое по тому времени машиностроение, в области науки о машинах отстала не только от других индустриальных держав, но и от значительно уступавшей им в промышленном отношении России. Объясняется этот парадокс как поздним и недостаточным развитием в США физико-математических наук вообще, так и специфической направленностью американской высшей технической школы. Если английская школа в сущности повышала квалификацию студентов, достаточно знакомых со своей профессией, а французская готовила инженеров-чиновников, то американская призвана была готовить инженеров, легко ориентирующихся в любых производственных условиях и способных выполнять любую техническую работу. А при такой постановке дела для изучения теории времени не оставалось.

Но дело было не только в этом. Первые два десятилетия XX в. характеризуются падением интереса к механике машин, а это тормозило постановку научно-исследовательской работы в области теории механизмов и машин и прилив в нее молодых сил. Так обстояло дело в странах старой научно-технической культуры; высшая техническая школа в США, где механика машин как науки просто не существовало, естественно, оказалась в еще более трудном положении.

Однако снижение интереса к вопросам теории механизмов отнюдь не означало полного прекращения научной работы в этой области: Виттенбауэр и его ученики в Австрии и Германии, Бурместер в Мюнхене, Мор и Грюблер в Лейпциге продолжали свои исследования в области механики машин. Кроме того, в начале столетия вышли на первый план исследования Н. Е. Жуковского и его многочисленных учеников, в результате которых теория механизмов и машин приобрела объединяющие ее идеи, развила ряд новых методов и новых научных направлений. Идеи школы Жуковского составили важнейшую составную часть того наследства, которое получила советская школа теории механизмов и машин от русских ученых.

⁵⁰ R. F. Mc Kay. The Theory of Machines. London, 1915.

⁵¹ P. Schwamb, A. L. Merrill. Elements of mechanism. N. Y., 1904. В сущности это было второе издание учебника, написанного профессором Массачусетского технологического института Швамбом и изданного впервые в 1885 г. Переработку произвел профессор того же института Эллин Л. Меррилл.

⁵² E. S. Ferguson. Kinematics of Mechanisms..., p. 224.

РУССКАЯ ШКОЛА МЕХАНИКИ МАШИН

Поиски общей теории машиностроения, характерные для двух последних десятилетий XIX в., как мы видели, не увенчались успехом. Созданная наука о машинах оказалась слишком далекой от практики. Получился заколдованный круг: в результате поисков от науки о машинах отпочковывались все новые и новые технические и прикладные направления, предмет ее все более суживался и уточнялся, но дать ответ на вопросы практики она не могла.

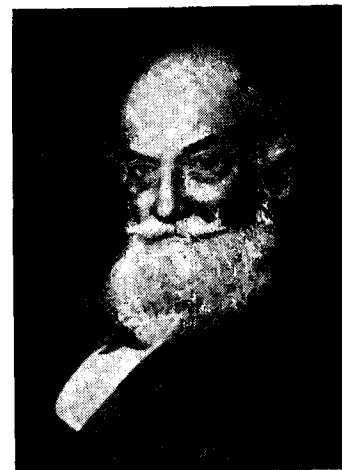
Однако в России положение с наукой о машинах оказалось несколько иным, чем это было в странах Западной Европы. Здесь к концу XIX в. прикладная механика стала обязательным предметом высшего технического образования и делилась на две части, а иногда и на два самостоятельных курса: теорию механизмов и теорию машин. Кроме того, прикладная механика читалась на физико-математических факультетах университетов. Научно-исследовательской работой в области прикладной механики в этот период занимался целый ряд выдающихся ученых — Н. Е. Жуковский, В. П. Горячкин, М. И. Мерцалов, Л. В. Ассур и другие, работы которых имели подчас эпохальное значение для развития науки.

С Москвой связано было творчество «отца русской авиации» — Н. Е. Жуковского.

Николай Егорович Жуковский родился 17 января 1847 г. в городе Орехове Владимирской губернии в семье инженера. По окончании гимназии он в 1864 г. поступил на физико-математический факультет Московского университета, который окончил в 1868 г. Уже на первом курсе он проявил особенный интерес к математике и по рекомендации астронома М. Ф. Хандрикова был принят в кружок любителей математических наук, созданный по инициативе Н. Д. Брашмана (впоследствии он развился в Московское математическое общество).

С 1872 г. Жуковский начал читать практическую механику в Московской практической академии (среднее специальное учебное заведение), работая одновременно преподавателем математики в Московском техническом училище. В 1874 г. по рекомендации Ф. Е. Орлова он был утвержден доцентом по кафедре аналитической механики в этом училище. Дружба с Ф. Е. Орловым имела для Жуковского большое значение: Орлов ввел его в Политехническое общество при училище, познакомил с московскими инженерными кругами.

В 1877 г. Жуковский был направлен в заграничную командировку. В Париже он познакомился с Резалем, Дарбу, Леви. По возвращении из-за границы, в 1879 г., он был назначен сверхштатным профессором механики в Московском техническом училище, одновременно преподавал математику в женской гимназии. В 1876 г. он защитил магистерскую диссертацию на тему «Кинематика жидкого тела». В 1882 г. совет Московского университета присудил Жуковскому степень доктора прикладной математики за диссертацию «О прочности движения», а в 1886 г. он начал чтение лекций по аналитической механике в Московском университете. В 1887 г. он был утвержден штатным профессором аналитической механики в Московском высшем техническом училище, а в 1894 г. был избран членом-корреспондентом Академии наук. В 1900 г. Жуковский должен был баллотироваться в действительные члены Академии наук, но снял свою кандидатуру, когда выяснилось, что для этого он должен был бы переехать в Петербург: он не хотел порывать с Московским университетом и МВТУ, где были его ученики и товарищи по работе, где начинала складываться русская школа механики машин. В 1905 г. Н. Е. Жуковский был избран президентом Московского математического общества.



Н. Е. Жуковский

Интерес Н. Е. Жуковского к проблемам теории механизмов не был случайным и составлял органическую часть его научного творчества. Особенно интересовался Жуковский шарнирными механизмами. Можно сказать, что он был популяризатором идей механики машин — читал доклады в Политехническом обществе, в Обществе любителей естествознания, антропологии и этнографии, в Московском математическом на темы: «О приборе Кемпе для решения числовых уравнений высших степеней», «О трении в машинах», «Планиграф Дарбу», «О рычажном дубликаторе Делоне», «О механизме Ассура» и др. Опубликовал более 10 работ по механике машин, в том числе «Распределение давлений на нарезке винта и гайки» (1902), «Сведение механической задачи о кинематической цепи к задачам о рычаге» (1909). Эта последняя работа, в которой дано чрезвычайно красивое решение общей задачи кинестатики, по справедливости вошла в золотой фонд науки о машинах, а теорема Жуковского о жестком рычаге входит в обязательный минимум знаний каждого студента, изучающего теорию механизмов.

Об инженерной интуиции Н. Е. Жуковского свидетельствует интересный факт, описанный В. В. Голубевым: «Молодой инженер, только что окончивший МВТУ, где он, между прочим, слушал лекции у Николая Егоровича, попал инженером на завод в глухую провинцию, где посоветоваться и поучиться было не у кого. Как всегда бывает в таких случаях, он сейчас же почувствовал, что многого не знает и опыта никакого не имеет. А тут еще как на грех на заводе случилась авария: у только что выпущенной сложной заграничной машины сломался коленчатый вал, который завод своими силами исправить или заменить не мог. Надо было отправить вал далеко на большой завод или выписывать новый; на дворе стояла весенняя распутица, привезти вал быстро было нельзя, а каждый день простоя машины грозил заводу большими убытками. Молодой инженер совершенно растерялся и в полном отчаянии написал Николаю Егоровичу письмо с просьбой помочь ему, приложил схему машины и каталог завода, откуда машина была выписана. С ближайшей почтой получил ответ. Николай Егорович ему писал, что такой машины он никогда не видал, для чего она нужна, представляет неясно, разобрав по описанию в каталоге машины он не смог, но так как, судя по присланной схеме, в машине действуют такие-

то и такие-то моменты, то он считает, что машину можно исправить очень просто: коленчатый вал надо вынуть, а действие его заменить такими-то и такими-то шестеренками, которые они смогут сделать домашними средствами у себя на заводе...

Шестеренки были заточены, коленчатый вал был вынут, и к общему изумлению машина стала работать лучше, чем прежде»¹.

Редкое по своей целостности, органическое слияние теории с практикой было характерной особенностью научного творчества Жуковского. В то время теоретики в большинстве случаев считали ниже своего достоинства заниматься вопросами практики, а он создал целую школу, занимавшуюся исследованием технических проблем, прикладной механикой в полном смысле этого слова. Работы Жуковского в области аэродинамики, принесшие ему мировую славу и положившие начало созданию русской авиации, являются лучшим примером его научного метода.

Жуковский был не только великим ученым, но и замечательным педагогом. Свое педагогическое мастерство он развил, будучи преподавателем в средних школах. Его лекции славилась глубоким знанием предмета, ясностью и точностью изложения.

Курс прикладной механики, прочитанный Н. Е. Жуковским в Московской практической академии коммерческих наук, был впервые издан в 1901 г. по запискам слушателей.

Курс состоит из трех частей: теории механизмов, передачи работы в машине и гидравлики. Начинается он определением машины: «Всякая машина состоит из трех существенных частей. Первая часть машины есть та, на которую непосредственно действует сила двигателя; эта часть называется приемником. Вторая часть машины служит для передачи и преобразования движения; эта вторая часть машины называется механизмом. Наконец, третья часть машины служит для обработки тел и называется орудием. Если будем рассматривать целую фабрику как одну машину, то в ней каждую из упомянутых частей называют машиной: машина-двигатель, передаточная машина, маши-

¹ В. В. Голубев. Русские работы по механике и влияние их на развитие мировой науки. — «Ученые записки МГУ», 1947, вып. 91, с. 101.

на-орудие»². Теорию механизмов Жуковский излагает, пользуясь классификацией Виллиса, как и большинство преподавателей русских технических школ того времени. Однако у Виллиса он заимствует, в сущности, лишь деление на классы, избегав, таким образом, присущей этой классификации непоследовательности. Начав с понятия о кинематических парах по Рело, Жуковский переходит затем к механизмам первого класса (передача движения непосредственным соприкосновением); далее следуют фрикционные механизмы, зубчатые колеса, бесконечный винт, эксцентрики (кулачки); механизмы второго класса (передача движения посредством гибких тел): блоки, ворот, гибкие передачи; механизмы третьего класса (передача движения посредством твердых тел): шарнирные механизмы. В последнем разделе автор пользуется идеями Рело о преобразовании механизмов, а также разбирает направляющие механизмы Эванса, Уатта и Липкина.

Вторая часть, посвященная передаче работы в машине, охватывает вопросы уравнения живых сил, коэффициент полезного действия, статику механизмов и учение о трении, регулирование хода машин.

Когда Жуковский преподавал в средних учебных заведениях, ему приходилось «популяризировать» свое изложение. Это отразилось и на рассматриваемом курсе: он очень элементарен, но все же автор не делает никаких скидок в отношении строгой научности изложения: излагает последние новинки, недавно вошедшие в научный оборот, но делает это в доступной для слушателей форме.

Несколько лет Н. Е. Жуковский читал в МВТУ специальный курс регулирования машин. Этот курс был издан по студенческим запискам в 1909 г. Состоит курс из двух частей: статике регулятора и динамики регулятора. Первая часть охватывает ряд вопросов кинестатики и динамики, не входивших тогда в программу курса прикладной механики (приведенная масса и сила, уравнения движения в форме Лагранжа, способ Виттенбауэра для определения массы маховика), а также вопросы, относящиеся к механике регулятора и описанию различных систем. Вторая часть содержит уравнение движения в форме, предложенной Толле, анализ Лекорню, исследование влияния катаракта,

задачу Грдины и некоторые другие вопросы. Как известно, Н. Е. Жуковский считал, что Вышнеградский допустил ошибку в анализе работы регулятора. Этому вопросу посвящено предисловие к книге³. В частности, Жуковский обратил внимание на то, что практическое применение метода Виттенбауэра сопряжено с трудностями точных графических построений как диаграммы масс-работ, так и касательных к ней под углами $\Psi_{\max}$ и $\Psi_{\min}$.

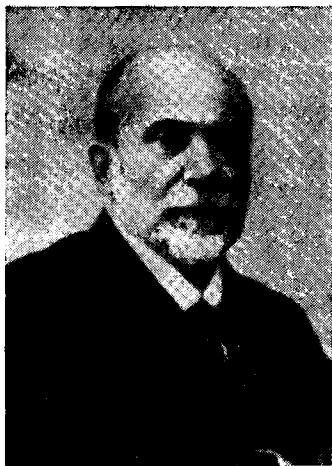
Известные учебники Н. Е. Жуковского по теоретической и аналитической механике также проникнуты идеей единства теории и практики; кроме того, как и другим его работам, им присущи новизна компоновки курса, экономность и изящество изложения. Примером такой экономности служит теорема Жуковского о жестком рычаге, сводящая определение уравнивающей силы к задаче о равновесии плана скоростей под действием моментов сил относительно полюса плана. В этой теореме он использовал свойства подобия механизма и его плана скоростей.

В Московском университете Н. Е. Жуковский читал основной курс теоретической механики, а приват-доценты В. М. Коваленский и Н. И. Мерцалов вели дополнительные занятия по прикладной механике. В начале XX в. в университете вновь возрос интерес к прикладным наукам, это было связано с промышленным развитием страны. Однако общественный подъем начала века сменился полосой жестокой реакции. В 1914 г. министр народного просвещения Кассо уволил выборного ректора Московского университета профессора А. А. Мануйлова и его проректоров. В ответ на эту репрессию свыше 100 преподавателей, в том числе С. А. Чаплыгин и Н. И. Мерцалов, ушли из университета, и его роль как научного центра резко снизилась.

В Московском высшем техническом училище прикладная механика была одним из основных предметов со времени его основания. Отчасти это объяснялось тем, что со времен А. С. Ершова механику в училище читали те же профессора, что и в университете, — лучшие научные силы Москвы. Кафедру теоретической механики организовал в 1878 г. Н. Е. Жуковский и с того времени руководил ею. Но существенное влияние он оказывал и на кафедру прикладной механики и машиностроения, важнейшую кафедру

² Н. Е. Жуковский. Аналитическая механика, теория регулирования, прикладная механика. М.—Л., Оборонгиз, 1939, с. 348.

³ Там же, с. 259—260.



Д. С. Зернов

училища, где работало много его учеников. Кафедра была многопредметной, здесь читались курсы прикладной механики (теории механизмов), сопротивления материалов, деталей машин, термодинамики, гидравлики. Среди преподавателей кафедры были П. К. Худяков, А. И. Сидоров, В. И. Гриневецкий, Д. С. Зернов, Н. И. Мерцалов, Л. П. Смирнов и др.

До 1898 г. прикладную механику в МВТУ читал Д. С. Зернов. Дмитрий Степанович Зернов (1860—1922) по окончании Московского университета прослушал курс Петербургского

технологического института, был адъюнкт-профессором Харьковского технологического института, затем работал профессором МВТУ по прикладной механике. В 1898 г. он вернулся в Харьков и по 1902 г. исполнял должность директора Харьковского технологического института. С 1902 г. был профессором и директором Петербургского технологического института, кроме того, читал прикладную механику в Горном институте и Морской академии. Принимал участие в работе ряда общественных организаций, за что был освобожден от должности директора института. Вторично был избран директором в 1908 г., но в 1913 г. опять был уволен «по выслуге лет». После Октябрьской социалистической революции был поднят вопрос о возвращении Зернова в институт. В 1920 г. он в третий раз был избран директором Петербургского технологического института и проработал в этой должности до конца своей жизни.

Курс Д. С. Зернова служил русской высшей технической школе на протяжении 35 лет; впервые он вышел из печати в 1896 г. Курс состоял из двух частей: теории механизмов и общей теории машин. По определению Зернова, «машина и механизм — это одно и то же, но лишь рассмат-

риваемое с разных точек зрения; машина — со стороны действия сил и производимых ими работ, механизм — со стороны движений, которые отдельные части могут иметь одна относительно другой»⁴. Автор предпосылает курсу некоторые сведения из кинематической геометрии: плоское движение, понятие о центрах вращения, теорию ползид и огибающих, теорему Савари, понятие о поворотном круге. Кинематику Зернов излагает по Рело; в качестве классификации принимает классификацию Виллиса с некоторыми изменениями, предложенными Буром. «Несовершенство этой классификации выступает наглядно, если обратить внимание на то, что, например, механизмы, полученные из одной и той же плоской четырехзвенной цепи, распределены по всем трем классам, а между тем они связаны общим происхождением из одной и той же цепи и, как мы видели, должны рассматриваться вместе»⁵. Это замечание Д. С. Зернова было принято большинством русских преподавателей прикладной механики, которые пользовались классификацией Виллиса, внося в нее необходимые коррективы. Зернов выделял три группы, учитывающие тип передачи (непосредственным соприкосновением, промежуточными твердыми звеньями, гибкими телами), и три класса (отношение скоростей постоянное, переменное, постоянное или переменное).

Очень подробно Зернов разбирает механику зубчатых зацеплений. Модуль он не вводит и все размеры колеса берет в долях шага. Уделяет он внимание также графическому изображению и некоторым специальным случаям зубчатых зацеплений.

Вторую часть курса, посвященную общей теории машин, Д. С. Зернов начинает с изложения основ паровой машины. Собственно к динамике машин относятся три раздела второй части: общие условия работы машин, регулирование хода машин и основы учения о вредных сопротивлениях (трение скольжения, трение качения и трение гибких тел).

Таким был уровень знаний по прикладной механике в конце прошлого века. Но уже через десять лет, в 1909 г., в МВТУ читались вступительный курс, теория механизмов, общая теория машин и ряд спецкурсов и, кроме того, выполнялись графические работы. В качестве спецкурсов, в

⁴ Д. С. Зернов. Прикладная механика, ч. 1. Теория механизмов, М., 1896, р. 5.

⁵ Там же, с. 155.

частности Жуковским, были прочитаны курсы о регулировании хода машин и теория регуляторов. Вступительный курс под названием «Элементы машиноведения», читавшийся А. И. Сидоровым⁶, представлял собой нечто вроде энциклопедии по машиностроению: он давал общие понятия о теории механизмов и машин, машиноведении, применении механики упругого тела к расчету деталей машин, об общих принципах проектирования деталей машин и самих машин. Курс был обязательным и читался по два часа в неделю в первом полугодии.

Л. П. Смирнов (1877—1954) по окончании в 1897 г. училища по рекомендации Н. И. Мерцалова был оставлен при кафедре. Его научная деятельность была связана с исследованиями механики паровых машин и ряда вопросов кинематики и динамики механизмов. Одной из его первых работ, выполненных в стенах МВТУ, было исследование шарнирных механизмов. «Кинематическое и динамическое исследование многозвенных шарнирных механизмов» имело, по его словам, целью «...в своей первой части дать самый общий графический метод нахождения скоростей каких угодно точек многозвенных шарнирных механизмов, а в своей второй части использовать этот метод для исследования сил трения в шарнирах направляющих; третья часть будет посвящена динамическому исследованию механизмов того же рода»⁷.

Собственно прикладная механика была обязательной только для механиков (химики слушали сокращенный курс) и читалась в течение двух полугодий по четыре лекционных часа в неделю. Кроме того, на упражнения по кинематике в течение первого полугодия отводился один час в неделю. Читал прикладную механику в эти годы Н. И. Мерцалов. Раздел «Теория механизмов» включал следующие темы: общие кинематические теоремы о движении неизменяемой системы, движение параллельно плоскости, шарнирные механизмы, винтовые механизмы, зуб-

чатые передачи, зубчатые механизмы, кулачковые механизмы, шарнир Гука, направляющие механизмы; раздел «Общая теория машин» включал учение о передаче работы в машинах и коэффициенте полезного действия, учение о вредных сопротивлениях, колебании машин и их частей, способы измерения работы в машинах, регулирование хода машин.

Графические работы по прикладной механике были обязательными для студентов механического отделения. На них отводилось по два часа в неделю во втором полугодии. В качестве заданий предлагались: графическое исследование четырехшарнирных механизмов, их видоизменений и комбинаций, построение и графическое исследование зубчатых зацеплений, определение работы сил трения в зацеплении, проектирование механизмов по заданным кинематическим условиям⁸.

Курс, читавшийся на химическом отделении, включал прикладную механику и детали машин. Читал его А. И. Астров. Курс давал сведения об уравнении живых сил в приложениях к машинам, учение о вредных сопротивлениях и элементы кинематики механизмов со сведениями о деталях машин. Автор вводит понятие модуля зубчатого зацепления: «...определяя шаг по уравнению, обыкновенно бывает удобно округлить получаемое значение t до того, чтобы отношение t/π (так называемый модуль зацепления) был целым числом, так как только в этом случае радиус колеса $r=zt/2\pi$ может измеряться рациональным целым числом»⁹. Курс содержит также некоторые сведения о проектировании маховых колес.

Значительную роль в развитии русской науки о машинах сыграл Николай Иванович Мерцалов. Он родился в 1866 г. в Туле. Учился в Тульской классической гимназии, затем на математическом отделении Московского университета. По окончании университета (1888) Н. И. Мерцалов уехал в Германию, где поступил рабочим на машиностроительный завод и одновременно слушал лекции в Дрезденском высшем техническом училище. В 1892 г. он вернулся на родину, через два года сдал магистерские

⁶ Анатолий Иванович Сидоров (1866—1931) окончил курс физико-математического факультета Московского университета, затем курс МВТУ. Был оставлен при училище для подготовки к профессорскому званию. С 1897 г. адъюнкт-профессор, с 1899 г. профессор по курсу построения машин. Читал курс деталей машин, издал «Очерки по истории техники» (ч. 1, 1925; ч. 2, 1928).

⁷ «Бюллетени политехнического общества, состоящего при Императорском техническом училище», 1908, № 8, с. 40.

⁸ См.: Обзор Московского технического училища за 1906/07 учебный год. М., 1906, с. 33—34.

⁹ А. И. Астров. Конспект по курсу практической механики, ч. I. М., 1907, с. 122.

экзамены в Московском университете и экзамены экстерном в МВТУ. В МВТУ ему было присвоено звание инженера-механика. В 1895 г. Мерцалов начал читать лекции в университете в должности приват-доцента, а в 1897 г. по рекомендации Н. Е. Жуковского был избран адъюнкт-профессором МВТУ по прикладной механике.

Лекции Н. И. Мерцалова в МВТУ были положены в основу его курса прикладной механики, впервые отпечатанного на стеклографе в 1904 г., переизданного в обработке М. И. Фелинского в 1914—1916 гг. и под редакцией В. В. Добровольского в 1952 г.¹⁰ Курс Мерцалова, охватывающий кинематику механизмов и динамику машин, явился событием в русской технической литературе и, по словам И. И. Артоболевского, представляет собой в сущности не учебник, а глубокий научный трактат, в котором обобщены вопросы теории механизмов и машин.

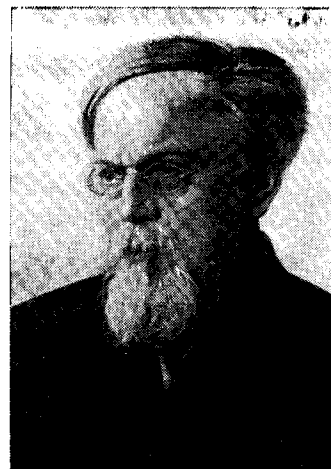
Следуя традиции, Н. И. Мерцалов пользуется классификацией Виллиса, но дополняет ее идеями Рело. Новшеством был вводный раздел, в котором излагались основы кинематической геометрии. «В курсе «Кинематика механизмов» мы имеем исключительное, доведенное до изящества, в некоторых случаях до виртуозности изложение теории механизмов на основе применения геометрических методов анализа и синтеза. Эта виртуозность и изящество сближают эту книгу с лучшими классическими сочинениями французских геометров XIX в. В курсе кинематики механизмов с предельной ясностью излагаются основы кинематической геометрии и их применения к задачам исследования механизмов методами центроид, поворотных кругов и т. д. В этой же книге широко поставлена задача синтеза плоских механизмов, что послужило основанием для дальнейших работ в этой области; рассмотрена теория синтеза некруглых колес, передача движения центроидами и взаимноогнбаемыми кривыми и т. д. Далее, в этой же работе дано решение некоторых частных задач синтеза шарнирных механизмов и, в частности, решение задачи о синтезе направляющих шарнирных механизмов с помощью поворотных кругов.

Чтобы оценить значение второго капитального труда Н. И. Мерцалова — его курс «Динамика механизмов», надо

указать, что до 1923 г. в мировой литературе по сути дела отсутствовал систематический курс динамики механизмов. Только в 1923 г. появляется труд профессора Виттенбауэра «Графическая динамика». Таким образом, мы можем считать, что книга Н. И. Мерцалова была первым крупным синтетическим трудом по основам динамики механизмов.

Основной частью книги является изложение методов динамического исследования механизмов. Для решения этой задачи Н. И. Мерцалов широко использует принцип Д'Аламбера. При решении задачи теории регулирования машин и исследовании движения машин под действием заданных сил Н. И. Мерцалов не идет проторенными путями. Он не использует, например, диаграмму: приведенная масса — кинетическая энергия, применяет свой оригинальный метод исследования, основанный на использовании жесткого рычага Жуковского, отдельные отрезки которого обладают массами исследуемых звеньев механизмов. С помощью оригинальных, разработанных им методов он дает новое решение задачи о расчете махового колеса, которое, как показал позднее профессор Е. М. Гутъяр, является более точным и удобным, чем решение Виттенбауэра¹¹.

Мерцалов не только использовал планы скоростей и жесткий рычаг Жуковского для расчета маховика. Он расширил возможности применения теоремы Жуковского тем, что отрезкам придавал массы исследуемых звеньев механизма. При расчете маховика он определял приращение кинетической энергии маховика построением двух кривых: основной кривой кинетической энергии машины и кривой



Н. И. Мерцалов

¹⁰ Н. И. Мерцалов. Избранные труды. Под ред. В. В. Добровольского, т. 1. М., Машгиз, 1952.

¹¹ И. И. Артоболевский. Жизнь и деятельность Николая Ивановича Мерцалова. — «Труды семинара по теории механизмов и машин», 1949, т. VII, вып. 26, с. 12

кинетической энергии приведенных возвратно-поступательно движущихся масс, определенных для средней скорости кривошипа.

В конце XIX в. вопросами прикладной механики на Украине занимались в основном в Новороссийском (Одесском) университете. В первом десятилетии XX в. положение меняется: в Харькове и Киеве, а затем в Екатеринославе (Днепропетровске) открываются высшие технические школы, которые становятся центрами научной и педагогической деятельности в области прикладных и технических наук.

В Харьковском университете преподавание курса прикладной механики было введено в середине XIX в.; первым профессором, читавшим этот курс, был И. Д. Соколов. С 1872 г. курс прикладной механики читал В. Г. Имшенецкий. Он принял деятельное участие в создании кабинета прикладной механики, по его же инициативе в 1879 г. было создано Харьковское математическое общество, ставшее важным центром математических исследований на Украине.

В 1885 г. в Харьковский университет на должность приват-доцента поступил ученик П. Л. Чебышева по Петербургскому университету Александр Михайлович Ляпунов (1857—1918), окончивший математический факультет в 1880 г. В Харьковском университете А. М. Ляпунов читал ряд курсов по механике. Одновременно с 1887 по 1893 г. он читал лекции по аналитической механике в Харьковском технологическом институте. В своих курсах Ляпунов излагал ряд разделов, необходимых для прикладной механики. Так, в курсе кинематики он исследовал движение параллельно плоскости, приводил ряд важных теорем кинематической геометрии на плоскости и в пространстве. Он работал в Харькове до 1902 г., когда был избран академиком и переехал в Петербург.

На его место ординарным профессором механики был избран Владимир Андреевич Стеклов (1864—1926). Стеклов окончил Харьковский университет в 1887 г. и был назначен ассистентом А. М. Ляпунова по кафедре механики. В 1894 г. он защитил диссертацию на степень магистра, а в 1902 г. — на степень доктора прикладной математики. С 1893 по 1904 г. Стеклов читал различные курсы по механике, в частности прикладную механику в Харьковском технологическом институте. В 1906 г. он

получил кафедру в Петербургском университете. В 1902 г. он был избран членом-корреспондентом Академии наук, а в 1912 г. — академиком.

В 1885 г. был открыт Харьковский технологический институт. Здесь с 1886 г. прикладную механику читал В. И. Альбицкий, занимавшийся главным образом исследованием зубчатых зацеплений и опубликовавший несколько книг по этим вопросам. Здесь же преподавали В. Л. Кирпичев и Д. С. Зернов. Позже курс прикладной механики вел Георгий Федорович Проскура (1876—1958), ученик Н. Е. Жуковского и Н. И. Мерцалова по МВТУ. Он закончил МВТУ в 1901 г. и с 1904 г. начал преподавание в Харьковском технологическом институте, где читал ряд курсов по прикладной механике, в частности курс регулирования машин¹². В 1912 г. профессором прикладной механики и теории построения машин был избран Я. В. Столяров (1878—1945). Он опубликовал весьма оригинальный курс прикладной механики¹³ и «Опыт рациональной классификации механизмов», в котором предложил новое определение механизма и новую систематику механизмов. В основу своей классификации он положил три фактора, определяющих свойства кинематической цепи: число звеньев, кинематическую характеристику звеньев и кинематическую характеристику пар. Исходя из того, что состав механизма зависит от числа органов, Столяров разделил все механизмы на три отдела.

1. Простейшие механизмы, состоящие из двух органов, подвижного и неподвижного и, таким образом, представляющие собой не кинематическую цепь, а кинематическую пару. В этот отдел Столяров включает и некоторые «простые машины», например наклонную плоскость, рычаг, винт.

2. Простые механизмы, к которым относятся все простые кинематические цепи.

3. Сложные механизмы, образованные соединением простых кинематических цепей или сложными цепями.

¹² Г. Ф. Проскура. Регулирование хода машин-двигателей. — «Известия ХТИ», 1908, вып. 4.

¹³ Я. В. Столяров. Общий курс прикладной механики, ч. 1. Теория механизмов и машин. Харьков, 1911; ч. 2. Систематическое изучение механизмов, 1912; он же. Опыт рациональной классификации механизмов. Харьков, 1917.

Первый отдел делится на группы в зависимости от вида осуществляемого механизмом движения; второй — на классы. Из классов второго отдела наибольшее значение имеют первый — трехзвенные цепи и второй — четырехзвенные цепи. Каждый из этих классов делится на группы в зависимости от вида кинематических пар, связывающих звенья цепи. Третий отдел делится на два класса: сложные цепи из однородных механизмов, сложные цепи с боковыми ответвлениями.

Выше упоминалось, что в 1898 г. В. Л. Кирпичев занялся организацией Киевского политехнического института. По рекомендации Н. Е. Жуковского он пригласил на кафедру прикладной механики Д. П. Рузского. Дмитрий Павлович Рузский окончил математическое отделение Московского университета (1891) и МВТУ (1895). Служил затем на Ярославско-Рыбинской железной дороге, на Невском судостроительном заводе и в правлении Восточной дороги, где занимался проектированием буксирных пароходов, а затем получил командировку в Англию для наблюдения за постройкой этих пароходов.

Н. Е. Жуковский писал о нем В. Л. Кирпичеву: «Д. П. Рузский был у нас в университете хороший математик и аккуратный прилежный студент. Он писал сочинение на тему, предложенную Д. С. Зерновым. Курс технического училища прошел он с успехом и оставил у руководителей о себе добрую память. Впрочем, Вам об этом напишет обстоятельно Д. С. Зернов. Этой зимой я получил от Рузского его печатный труд: «Опыт теории гребных винтов». В нем автор излагает теорию гребных винтов наподобие теории активных турбин, обращая внимание на изменение количества движения массы воды, прилегающей к лопаткам винта. Он пользуется, таким образом, струйной теорией Эйлера, между тем как обыкновенно теория винта излагается на основании ударной теории Ньютона (или опытов над ударом потока воды на пластинку). Работа написана толково и приводит в конце к довольно простым приближенным формулам.

Жаль только, что автор не присоединил к своему труду исторического очерка и не поставил исследования в связь с исследованиями других писателей. Во всяком случае эта первая работа рекомендует автора с хорошей стороны. Я думаю, что в лице Д. П. Рузского Киевский политехнический институт может приобрести молодого

ученого, из которого может выработаться сильный профессор».

5 апреля 1901 г. Д. П. Рузский защитил диссертацию на звание адъюнкт-профессора (по работе, о которой писал Жуковский). Оппонентами были Н. Е. Жуковский и А. П. Котельников¹⁴.

Прочитанный Д. П. Рузским в Киевском политехническом институте курс лекций по прикладной механике был издан в 1899—1900 гг. в двух частях. Написан он под влиянием идей Д. С. Зернова. В 1908 г. он был переиздан.

Особенностями курса Д. П. Рузского являются его высокие педагогические достоинства и великолепно задуманные и выполненные иллюстрации. С этой точки зрения курс выгодно отличается от других русских учебников по прикладной механике. Каждой теме Рузский предпосылает вступление, в котором знакомит с историей вопроса. В первой главе он излагает кинематику плоской неизменяемой системы: траектории, скорости и ускорения точек, центры скоростей и ускорений, построение полюдов, огибаемых и огибающих, формулы Савари, понятие о круге перегибов. Вторую главу Рузский начинает разделом о синтезе механизмов, пытаясь ограничить поиски нужных механизмов путем построения областей, для которых определенные перемещения не возможны. Затем излагает основы структуры механизмов по Рело со следующей оговоркой: «Метод Рело остроумен и плодотворен: если им в настоящее время мало пользуются, то это происходит оттого, что Рело зашел в своих исследованиях слишком далеко, не говоря уже о тех противоречиях, в которые он сам впал. Самая главная ошибка его заключается в том, что он считает машинную систему чем-то вроде явления природы и потому не находит возможным оставить без внимания ни одного механизма, который можно получить из данной цепи, хотя бы этот механизм не имел абсолютно никакого практического значения. Нам кажется метод Рело вполне целесообразным, но только при его применении следует помнить, что машинная система есть созда-

¹⁴ Александр Павлович Котельников (1865—1940) окончил математический факультет Казанского университета (1888). Работал в Казанском университете и Киевском политехническом институте. Автор работ по векторному исчислению, механике, кинематической геометрии, винтовому исчислению.

ние человеческого гения, и останавливаться при преобразованиях данной цепи на тех механизмах, которые могут иметь практическое применение»¹⁵.

В основу курса Рузский кладет классификацию Виллиса, поясняя ее применение: «Если мы зададимся движением звена ведущего, то тогда, понятно, задача о движении всех других звеньев, не исключая и звена ведущего, становится вполне определенной. Но если мы изучаем механизм независимо от того станка или машины, в которую он включен, и не задаваясь законом движения звена ведущего, то, чтобы сделать задачу определенной, мы должны изучать отношение скоростей и отношение направлений»¹⁶.

Во втором и третьем разделах второй главы изложена теория шарнирных механизмов, в шестом — теория ременных и канатных передач (в частности, разобрано действие вариаторов). Третья глава посвящена пространственным механизмам.

Д. П. Рузский примыкал к группе прогрессивно настроенных профессоров института, поэтому министр торговли и промышленности, которому был подчинен институт, отказался утвердить его директором, хотя Рузского дважды избирали на эту должность. В 1911 г. из института были уволены три профессора — А. И. Нечаев, К. Г. Шиндлер и С. П. Тимошенко, в связи с чем многие преподаватели подали в отставку и в том числе Рузский.

Одновременно с Д. П. Рузским в Киевском политехническом институте (на химическом факультете) прикладную механику читал А. А. Радциг¹⁷. Его краткий курс прикладной механики¹⁸ неоднократно переиздавался и в течение многих лет служил учебником для специалистов-технологов. В нем достаточно подробно изложена динамика машин, что соответствовало научным интересам автора.

¹⁵ Д. П. Рузский. Кинематика машин. Киев, 1908, с. 54.

¹⁶ Там же, с. 155.

¹⁷ Александр Александрович Радциг (1869—1941) — выдающийся ученый в области теплотехники. Окончил Петербургский технологический институт (1891). Работал в Киевском политехническом институте (1900—1909), затем в Петербургском политехническом институте и других петербургских высших школах. С 1935 г. — член-корреспондент АН СССР.

¹⁸ А. А. Радциг. Прикладная механика. Киев, 1908.

Состав кафедры механики в Киевском политехническом институте в течение первых двух десятилетий его существования был очень сильным. Здесь, в частности, преподавали профессора Киевского университета Г. К. Суслев¹⁹, П. В. Воронец²⁰ и Н. Б. Делоне.

В 1900 г. в Киевском университете возникла дискуссия о сущности сил инерции, в которой приняли участие профессор университета Г. К. Суслев и В. П. Ермаков²¹. Причиной ее послужил вопрос о том, считать ли силы инерции реальными или мнимыми. Вопрос этот имел особое значение для высшей технической школы, так как студентов на лекциях по прикладной механике учили оперировать с силами инерции как с реальными силами, а на лекциях по теоретической механике убеждали в том, что силы инерции фиктивны.

В статье «Основные законы механики»²² В. П. Ермаков остановился на анализе центробежной силы, определяя ее как силу инерции, развивающуюся при изменении направления движения. Отсюда он пришел к заключению, что механики, отвергая реальность сил инерции, тем самым отвергают и существование реальной центробежной силы. Упругие силы, он считал, также могут быть причислены к разряду сил инерции. Чтобы уничтожить создавшееся по отношению к силам инерции противоречие, по его мнению, следовало внести некоторые коррективы в механику Ньютона, в частности, выразить третий закон Ньютона следующим

¹⁹ Гавриил Константинович Суслев (1857—1935). Окончил математический факультет Петербургского университета в 1880 г., профессор Киевского университета (1888—1919) и Высших женских курсов. С 1916 по 1919 г. работал в Киевском политехническом институте. Один из организаторов и с 1921 г. директор Одесского политехнического института.

²⁰ Петр Васильевич Воронец (1871—1923) — один из основоположников неголономной механики, ученик Г. К. Суслева. С 1898 по 1921 г. преподавал в Киевском университете и Киевском политехническом институте.

²¹ Василий Петрович Ермаков (1845—1922) — выдающийся математик и механик, профессор Киевского университета (1874—1922) и Киевского политехнического института (1898—1922), член-корреспондент Академии наук (1884). В 1898 г. В. Л. Кирпичев, ходатайствуя о привлечении В. П. Ермакова к преподаванию в политехническом институте, писал, что он, «без сомнения, по своим научным заслугам занимает одно из первых мест среди отечественных математиков».

²² В. П. Ермаков. Основные законы механики. — «Университетские известия». Киев, 1900, вып. 40, № 5.

щим образом: «В каждом теле развивается противодействие (сила инерции) внешней силе; это противодействие равно внешней силе, но противоположно по направлению».

Против этого предложения выступил Г. К. Суслов²³.

Николай Борисович Делоне (1856—1931) окончил Московский университет, в 1894 г. защитил в Новороссийском университете докторскую диссертацию на тему «Передача вращения и механическое черчение кривых шарнирно-рычажными механизмами». До 1898 г. Делоне читал теорию механизмов в Петербургском университете; к этому времени относится цикл его работ по теории механизмов, служащих для воспроизведения различных функциональных зависимостей.

С 1898 по 1900 г. Н. Б. Делоне — профессор Новоалександрийского сельскохозяйственного института, затем Варшавского политехнического института. В 1906—1928 гг. он читал механику в Киевском политехническом институте.

Н. Б. Делоне занимался исследованием шарнирных механизмов, особенно их синтезом, в ряде статей он предложил несколько спроектированных им механизмов, отличающихся особыми свойствами: механизмы с постоянным передаточным отношением, механизмы без мертвых положений, механизмы, в которых некоторая точка постоянно находится на середине изменяющегося расстояния между двумя другими точками, механизмы для черчения конических сечений и др. В этих механизмах Делоне развивает теорию Чебышева в области синтеза механизмов.

Начиная с исследований П. Л. Чебышева, интерес к теории шарнирных механизмов не покидал русских ученых, практически ими были подняты все темы, имевшие отношение к шарнирным механизмам, при этом не были оставлены в стороне и узкотехнические, которые, казалось бы, не сулили никакого практического выхода и необходимость их была осознана значительно позднее. В результате русскими машиноведами (и продолжателями идей Чебышева, и многочисленными учениками Жуковского, и воспитанниками Одесской школы Лигина) был накоплен большой запас идей и теорий о шарнирных механизмах, который в сущности не полностью освоен и в настоящее время. Инте-

ресные очерки по теории шарнирных механизмов появляются в учебниках и учебных пособиях того времени — в «Теоретической механике» П. О. Сомова, в учебниках Н. Б. Делоне. В «Курсе технической механики» (1912) Делоне и более ранних «Лекциях по практической механике» (1901) большое внимание уделяется вопросам кинематической геометрии, которые тогда (почти одновременно с графическими методами анализа) начали входить в учебную практику.

Д. Н. Зейлигер, с 1895 г. бывший профессором Казанского университета, работал над механикой подобно-изменяемых тел. В 1910 г. он издал «Кинематические этюды», а в 1912 г. — «Этюды по кинематической геометрии». В обеих работах он исследует вопросы теории плоских рулетт, некоторые вопросы кинематической геометрии на плоскости и основания винтового исчисления.

Совершенно новую область прикладной механики — динамику живых организмов — начал разрабатывать начиная с 1906 г. профессор Екатеринбургского горного института Я. И. Грдина²⁴. Этим предметом он начал заниматься после исследований в области теории регулирования, где получил новые результаты и в определенной степени завершил цикл работ по автоматическому регулированию механических систем (область, в которой важные работы принадлежали и русским ученым)²⁵.

Прикладную механику в петербургских технических школах читали В. Л. Кирпичев, Д. С. Зернов, несколько позже А. А. Радциг, К. Э. Рерих, Д. П. Рузский, А. В. Ассур. Кирпичев читал в Петербургском политехническом институте. Он первым из русских профессоров ввел в систему преподавания графоаналитические методы кинематики

²⁴ Ярослав Иванович Грдина (1871—1931). Родился в Пльзене, в Чехии. Вместе с родителями в раннем возрасте переехал в Россию, где окончил гимназию и Петербургский технологический институт (1894). Несколько лет работал инженером, затем преподавателем технического училища. В 1901 г. защитил диссертацию «Устойчивость движения машины, управляемой центробежным регулятором» и был избран профессором прикладной механики Екатеринбургского горного института. С 1919 г. заведовал кафедрой теоретической механики Екатеринбургского (Днепропетровского) университета.

²⁵ См.: Т. В. Пугача, Б. Н. Фрадлин. Ярослав Иванович Грдина. М., «Наука», 1970, с. 33.

²³ Г. К. Сулов. Основные положения динамики. — «Университетские известия». Киев, 1902, вып. 42, № 10.

механизмов, и его работы²⁶ были первыми в России в этом направлении. Излагая метод планов, или, как он его называет, картин скоростей, Кирпичев исходит из теоремы Шаля о существовании мгновенного центра в плоском движении неизменяемой фигуры. Как следствие из этой теоремы он получает правило подобия схемы механизма и картины его скоростей. Построение картины ускорений Кирпичев разбирает на примерах, так как общего метода еще не было. Не ясны ему и структурные различия механизмов. Так, для построения картин скоростей и ускорений кулисы Стефенсона он рекомендует пользоваться правилом ложных положений, но возможность применения его не следует.

После Д. С. Зернова прикладную механику в Петербургском технологическом институте читал К. Э. Рерих²⁷. Он написал несколько работ по применению метода планов скоростей и ускорений, построению положений механизмов, а также теории регулирования. Особенное значение имеет его классическое исследование по теории махового колеса²⁸, опубликованное в 1916 г. Монография К. Э. Рериха содержит много исторических экскурсов, справок и является, несомненно, одной из лучших работ о маховике. В первом разделе исследуется применение закона живых сил и принципа Даламбера, а также аналитическое определение периодических изменений скорости машины; второй посвящен способам улучшения равномерности вращения машин.

Первым профессором Петербургского политехнического института по кафедре теоретической механики был замечательный русский механик Иван Всеволодович Мещерский. Он родился в 1859 г. в Архангельске, окончил физико-математический факультет Петербургского университета (1882) и был оставлен Д. К. Бобылевым при кафедре

²⁶ В. Л. Кирпичев. Построение путей, описываемых точками плоского механизма.— В кн.: В. Л. Кирпичев. Собрание сочинений, т. 1. Спб., 1908; В. Л. Кирпичев. Построение картины скоростей и картины ускорений для плоских механизмов. Спб., 1909 (литографированное издание).

²⁷ Константин Эдуардович Рерих (1878—1936). Окончил Петербургский технологический институт (1909). Ассистент (1912), профессор (1915) по кафедре прикладной механики. Профессор Екатеринбургского горного института (1919).

²⁸ К. Рерих. Теория регулирования машин, ч. 1. Маховое колесо и периодическая неравномерность вращения машин. Пг., 1916.

для подготовки к профессорскому званию. С 1890 г. И. В. Мещерский начал преподавание в Петербургском университете в качестве приват-доцента по кафедре прикладной математики. Он читал графостатику, интегрирование уравнений механики, вел практические занятия. Тогда же он начал заниматься исследованиями механики тела переменной массы. В 1902 г. его пригласили в политехнический институт, где он проработал до конца своей жизни. Умер он в 1935 г.

Творчество Мещерского развивалось в двух планах. Это, во-первых, его работы в области динамики тела переменной массы, опубликованные в 1897 и 1904 гг. Во-вторых, создание задачника по механике для высшей технической школы. Задачник, созданный коллективом преподавателей Петербургского политехнического института под руководством И. В. Мещерского, является уникальным «долгожителем»: он уже служил русской, а затем советской технической школе около 70 лет и, нужно полагать, послужит еще дольше. Им пользуются немецкая, английская, американская и целый ряд школ других стран. К работе над задачником Мещерский привлек своих сотрудников, в том числе Л. В. Ассура, И. И. Бентковского, А. А. Горева, К. М. Дубягу, В. Ф. Миткевича, Е. Л. Николаи, К. Э. Рериха, Д. Я. Тагеева, В. В. Таклинского, А. И. Тудоровского, Л. К. Федермана, В. Д. Шатрова. Сам он проверил каждую задачу и решил ее вместе с ее автором. По словам члена-корреспондента АН СССР А. И. Тудоровского, над предложенной им задачей о гальванометре И. В. Мещерский просидел вместе с ним около четырех часов, пока не нашел всех возможных вариантов ее решения.

Сборник задач впервые был издан литографским способом в 1907 г.; первое типографское издание было выпущено в 1914 г.

Исследования И. В. Мещерского в области теории тела переменной массы являются основополагающими и на них основана теория движения аппаратов с воздушно-реактивным двигателем²⁹. Еще большее значение имеют работы Мещерского для теории механизмов и машин, поскольку большинство технологических машин является машинами с переменной массой.

²⁹ А. А. Космодемьянский. Научная деятельность И. В. Мещерского.— В кн.: И. В. Мещерский. Работы по механике тел переменной массы. М.— Л., Гостехтеоретиздат, 1949, с. 14.



Н. И. Мещерский

С 1907 г. в Петербургском политехническом институте начал работать ученик Жуковского Л. В. Ассур.

Леонид Владимирович Ассур родился в 1878 г. Он учился в Везенберге (Раквере, Эстония), Варшаве и Гродно, окончил Гродненскую гимназию и в 1897 г. поступил на математическое отделение физико-математического факультета Московского университета, где учился у Н. Е. Жуковского и Н. И. Мерцалова. Для получения инженерного образования Л. В. Ассур, следуя другим ученикам Жуковского, поступил в МВТУ, кото-

рое окончил в 1906 г. В этом же году он издал свою первую работу «К вопросу о плавности хода паровых машин», посвященную определению давлений в парах кривошипно-шатунного механизма с учетом сил инерции. Кривошипно-шатунный механизм Ассур анализирует, пользуясь аналитическим и графическим методом исследования.

С осени 1907 г. Ассур начал вести занятия в Петербургском политехническом институте по машиностроительному черчению и теоретической механике на кафедре И. В. Мещерского. Через год он перешел на кафедру прикладной механики, а в 1910 г. был избран штатным преподавателем. В 1911 г. он сдал экзамены на звание адъюнкта. В 1915 г. Л. В. Ассур начал читать курс теории механизмов, а в 1916 г. защитил диссертацию на тему «Исследование плоских механизмов с точки зрения их структуры и классификации»³⁰. Официальными оппонентами его были Н. Е. Жу-

ковский, Д. Н. Зейлигер и А. А. Радциг. В 1918 г. Л. В. Ассур был избран профессором прикладной механики Петроградского политехнического института. Умер он в 1920 г.

«По свидетельству его товарищей и сотрудников, внешне Л. В. Ассур производил впечатление замкнутого, сурового человека. Он отличался большой выдержанностью, спокойным характером, большой аккуратностью и педантичностью. Каждый последующий день у него еще накануне был расписан. Л. В. Ассур отличался большой работоспособностью и отдавал почти все свободное от преподавания время научной работе. Он очень любил музыку, играл сам и сочинял ее. В музыке был его отдых. Ученики Л. В. Ассура отмечают его требовательность к студентам, большую четкость и ясность его лекций и удачное сочетание аналитических и графических методов решения задач исследования и проектирования механизмов. Он прививал в своих слушателях навыки к самостоятельному мышлению, в частности, он часто вместо экзамена практиковал доклады студентов на семинарах»³¹.

Все научное творчество Л. В. Ассура было подчинено одной теме — поискам общих методов кинематического анализа плоских механизмов. Как и у большинства русских машиноведов, идеи Ассура были основаны на теории шарнирных механизмов.

Уже в конце XIX в. проблема анализа стала одной из важнейших и над ней одновременно работали машиноведы многих стран. Даже такой мощный метод, как метод планов скоростей и ускорений, не дал требуемого обобщения и свелся к решению серии типовых задач.

Первые работы Ассура были посвящены обоснованию метода планов; написал он и соответствующее руководство. Затем он предпринял исследование аналогов ускорений, под которыми подразумевал ускорения точек звеньев кинематической цепи, полученные при условии равномерного вращения ведущего звена механизма. Таким образом производилась геометризация кинематического параметра.

³⁰ В то время степени магистра и доктора присваивались в России только университетами, причем исключительно по «университетским» дисциплинам. Такая степень признавалась всеми русскими высшими учебными заведениями. Высшие технические школы имели право присваивать только степень адъюнкта, причем эта степень признавалась лишь в том институте, в котором она была присвоена.

³¹ И. И. Артоболевский. Леонид Владимирович Ассур и его работы по теории механизмов. — В кн.: Л. В. Ассур. Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации. М., Изд-во АН СССР, 1952, с. 586—587.



Л. В. Ассур

Ассур показал, что ускорения всех точек можно получить при помощи плана скоростей и плана аналогов ускорений. Последние он применил и к исследованию механизмов с несколькими степенями свободы. Эти работы были изданы в 1908—1909 гг.

В 1911 г. Ассур опубликовал учебно-методическое пособие «Картины скоростей и ускорений точек плоских механизмов». В отличие от В. Л. Кирпичева Ассур не удовлетворяется приведением типовых задач, а стремится найти в них общее. При исследовании механизмов он применяет метод образования при помощи наложения

групп и метод особых точек. «Метод ложных положений Л. В. Ассур рассматривает как соподчиненный методу особых точек, т. е. считает его применение целесообразным только в случае невозможности нахождения на чертеже особых точек. Любопытно отметить, что в том случае, когда Ассур отходит от принципа образования механизма путем последовательного наложения групп, он рекомендует применение метода ложных положений, считая, по-видимому, метод особых точек для этих случаев неприемлемым»³².

Основная работа Л. В. Ассура «Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации», опубликованная в 1914—1918 гг. в «Известиях Петроградского политехнического института», является одним из классических произведений теории механизмов и машин. Она состоит из двух частей: основ учения о нормальных многоповодковых цепях и приложения учения о многоповодковых нормальных цепях к общей теории механизмов. В первой части Ассур исследует

метод развития поводка, получающиеся при этом простейшие механизмы, механизмы, в состав которых входят замкнутые цепи, и механизмы высших семейств. Структуру любого плоского механизма он сводит к наложению специально построенных шарнирных кинематических цепей на существующие механизмы, доказывая при этом принужденность движения полученным таким образом многозвенным замкнутым цепям и единственность движения. Принимая структурную классификацию Ассура, мы исключаем применение иных методов образования механизмов, так как она претендует на универсальность. Во второй части книги Ассур исследует применение предложенного им метода к решению конкретных задач кинематики механизмов.

Классификация плоских механизмов, предложенная Л. В. Ассуром, заключается в следующем. Все плоские механизмы разделены на четыре класса (но возможно и большее число классов). К первому классу относятся механизмы, образуемые наращиванием двухповодковых, трехповодковых и n -поводковых групп (n — произвольное целое число) при единственном условии: каждое жесткое звено должно иметь хотя бы один поводок. Если этот единственный поводок развивается в жесткое звено, то образующийся таким образом механизм относится уже ко второму классу. Механизмы, в состав которых входят замкнутые контуры, относятся к третьему классу, а механизмы, имеющие несколько замкнутых контуров, на которых Л. В. Ассур прекращает свое исследование, — к четвертому классу.

Система Ассура, несмотря на ряд несовершенств, одним из которых является то, что подавляющее большинство механизмов в ней относится к первому классу и самому элементарному его подразделению, была положена в основу



В. П. Горячкин

³² И. И. Артоболевский, Леонид Владимирович Ассур и его работы по теории механизмов, с. 583.

первых исследований советской школы теории механизмов и машин. Ее теоретическое и методическое достоинство заключалось в безупречном проведении принципа единства при исследовании механизмов.

Таким образом, как мы видим, в исследование шарнирных механизмов русские ученые внесли чрезвычайно весомый вклад и направили это исследование по научному пути.

Еще одним важным направлением в теории машин, основы которого были заложены в России в первых десятилетиях нашего века, явилось учение о рабочих машинах, разработанное учеником Н. Е. Жуковского В. П. Горячкиным.

Василий Прохорович Горячкин (1868—1935) окончил математическое отделение Московского университета, а затем в 1894 г. МВТУ, где получил звание инженера-механика. В 1894 г. по рекомендации директора МВТУ, поддержанной Жуковским, Горячкин был приглашен в Московский сельскохозяйственный институт для постановки преподавания курса «Учение о сельскохозяйственных машинах и двигателях». Для подготовки этого курса он был командирован в Германию и Францию. По возвращении из-за границы В. П. Горячкин был назначен адъюнкт-профессором института по кафедре учения о сельскохозяйственных машинах, орудиях и двигателях.

Ознакомившись с постановкой преподавания этого предмета в русских и иностранных высших школах, а также с существующей литературой, Горячкин установил, что такого курса по существу не было нигде, ибо не было и самого учения. Как мы видели выше, к началу XX в. теория механизмов и машин свелась к кинематике механизмов, основой которой было учение о приводе, и к теории или динамике машин, представлявшей собой учение о двигателе, а точнее, о динамике паровой машины. Учение же о рабочих или технологических машинах выпало из поля зрения машиноведов, им занимались технологи и свелось оно к чисто описательным курсам. Таким образом, начинать приходилось на пустом месте.

Базой для создания теории технологических машин для Горячкина явился парк сельскохозяйственных машин, достаточно большой и разнообразный и в те годы. Дело в том, что сельскохозяйственное производство характеризуется большим разнообразием и сложностью технологических

процессов, поэтому конструкции применяемых там машин также довольно сложны и в них чаще, чем в машинах других производств, используются пространственные механизмы.

Одной из первых работ Горячкина была статья «Отвал. К графической теории плуга» (1898), где он заложил основы механики грунтов, и, что еще более важно, она явилась основополагающей для создания теории землеройных машин вообще, в какой бы отрасли производства они ни использовались. Кроме того, это была одна из первых попыток создания механики рабочих машин.

В 1909 г. В. П. Горячкин публикует монографию «Теория жатвенных машин», в 1910 г.— «Теорию барабана», в 1907 г.— «Зерносушилки», в 1908 г.— «Веялки и сортировки». В 1914 г. выходит в свет его работа «Силы инерции и их уравнивание», в которой исследуются многие вопросы кинематики и кинестатики машин.

В 1919 г. выходит большая монография Горячкина «Земледельческая механика», представляющая собой первое в мировой научной литературе сочинение, где обобщены вопросы теории рабочих машин.

В 1913 г. Горячкин организовал при Московском сельскохозяйственном институте машиноиспытательную станцию, которой руководил до 1928 г.

В 1918 г. он возглавил совет профессоров Московской сельскохозяйственной академии, с 1919 по 1922 г. был ее ректором. Он создал в составе академии инженерный факультет, пригласив туда лучших московских профессоров, в том числе Н. И. Мерцалова. По инициативе Горячкина были созданы первые научно-исследовательские институты сельскохозяйственного машиностроения. Свои исследования он интенсивно развивал в послереволюционное время, сделав чрезвычайно большой вклад в создание советской науки о машинах.

На протяжении всего своего развития теория механизмов и машин находилась на стыке идей механики и теоретического машиностроения. Под несомненным влиянием механики машин возникла кинематическая геометрия и теоретическая кинематика; идеи статики и динамики стимулировали становление динамики машин и графических методов в теории механизмов. Однако запросы машиностроения наука о машинах полностью удовлетворить не могла: попытки разработать методы синтеза механизмов были неудачными, не было создано и теории рабочих машин.

Разработка новых направлений теории механизмов и машин стала делом ученых второй четверти XX в.: важную роль в этом сыграла советская школа механики машин.

ЛИТЕРАТУРА

- Альберти Л. Б. Десять книг о зодчестве, т. 1—2. Пер. В. П. Зубова. М., Изд-во Всесоюзной академии архитектуры, 1937.
- Антонов А. М. Русские ученые — основоположники теории механизмов. Краткий очерк. М., Машгиз, 1951.
- Артоболевский И. И. Русская школа по теории машин и механизмов. — «Изв. АН СССР, ОТН», 1943, № 7.
- Артоболевский И. И. Роль и значение П. Л. Чебышева в истории развития теории механизмов. — «Изв. АН СССР, ОТН», 1945, № 4-5.
- Артоболевский И. И. Русская наука о механизмах. — «Вестник АН СССР», 1945, № 5-6.
- Артоболевский И. И. Русская школа теории механизмов и машин. — «Ученые зап. МГУ», 1947, вып. 91.
- Артоболевский И. И. Жизнь и деятельность Николая Ивановича Мерцалова. — «Труды Института машиноведения. Семинар по теории машин и механизмов», т. VII, вып. 26. М., Изд-во АН СССР, 1949.
- Артоболевский И. И. Основоположник земледельческой механики, выдающийся советский ученый Василий Прохорович Горячкин. — «Изв. АН СССР, ОТН», 1950, № 11.
- Артоболевский И. И. Краткий очерк жизни и деятельности В. В. Добровольского. — «Труды Института машиноведения. Семинар по теории машин и механизмов», т. IX, вып. 36. М., Изд-во АН СССР, 1950.
- Артоболевский И. И. Леонид Владимирович Ассур и его работы по теории механизмов. — В кн.: Л. В. Ассур. Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации. М., Изд-во АН СССР, 1952.
- Артоболевский И. И. Работы Н. Е. Жуковского по прикладной механике. — «Труды Института машиноведения. Семинар по теории машин и механизмов», т. XII, вып. 46. М., Изд-во АН СССР, 1952.
- Артоболевский И. И. Леонардо да Винчи — ученый и инженер. — «Труды Института машиноведения. Семинар по теории машин и механизмов», т. XIII, вып. 51. М., Изд-во АН СССР, 1953.
- Артоболевский И. И. Очерк развития теории механизмов для воспроизведения кривых. — В кн.: Вопросы истории естествознания и техники, вып. 10. М., Изд-во АН СССР, 1960.
- Артоболевский И. И., Боголюбов А. Н. Леонид Владимирович Ассур. М., «Наука», 1971.

Артоболевский И. И., Бруевич Н. Г. Русская школа по теории механизмов.— «Изв. АН СССР, ОТН», 1945, № 4-5.

Артоболевский И. И., Левитский Н. И. Механизмы П. Л. Чебышева.— В кн.: Научное наследие П. Л. Чебышева, т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1945.

Артоболевский И. И., Левитский Н. И. П. Л. Чебышев и русская теория механизмов (к 50-летию со дня смерти).— «Труды Института машиноведения. Семинар по теории машин и механизмов», т. XI, вып. 5. М., Изд-во АН СССР, 1947.

Артоболевский И. И., Левитский Н. И. Модели механизмов П. Л. Чебышева.— В кн.: П. Л. Чебышев. Полное собрание сочинений, т. IV. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1948.

Артоболевский И. И., Левитский Н. И. Работа П. Л. Чебышева «Теория механизмов, известных под названием параллелограммов» и применение метода поправок к решению задач синтеза механизмов.— В кн.: П. Л. Чебышев. Теория механизмов, известных под названием параллелограммов. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1949.

Артоболевский И. И., Левитский Н. И. Развитие приближенных методов синтеза механизмов по Чебышеву.— В кн.: П. Л. Чебышев. Теория механизмов, известных под названием параллелограммов. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1949.

Бек Т. Очерки по истории машиностроения, т. I. Пер. с нем. М.— Л., ГТТИ, 1933.

Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я., Шнейберг Я. А. История техники. М.— Л., Госэнергоиздат, 1956.

Бернал Дж. Наука в истории общества. Пер. с англ. М., ИЛ, 1956.

Боголюбов А. Н. К истории развития теории механизмов и машин.— «Труды Института машиноведения. Семинар по теории машин и механизмов», т. 20, вып. 78. М., Изд-во АН СССР, 1960.

Боголюбов А. Н. Основания науки о машинах в трудах Леонарда Эйлера.— В кн.: Вопросы истории естествознания и техники, вып. 13. М., Изд-во АН СССР, 1962.

Боголюбов А. Н. История механики машин. Киев, «Наукова думка», 1964.

Боголюбов А. Н. Развитие проблем механики машин. (Библиография). Киев, «Наукова думка», 1967.

Боголюбов А. Н. Августин Августинович Бетанкур. М., «Наука», 1969.

Боголюбов А. Н. Человек и машина. Киев, «Наукова думка», 1970.

Боголюбов А. Н. Очерки по истории механики. Киев, «Наукова думка», 1974 (на укр. яз.).

Боголюбов А. Н. Механика и машины.— В кн.: У истоков классической науки. М., «Наука», 1968.

Бриткин А. С., Видонов С. С. Выдающийся машиностроитель XVIII в. А. К. Нартов. М., Машгиз, 1950.

Виреинский В. С. Джордж Стефенсон. М., «Наука», 1964.

Витрувий. Десять книг об архитектуре. Пер. Ф. А. Петровского. М., Изд-во Всесоюзной академии архитектуры, 1936.

Гагарин Е. И. Леонтий Лукьянович Шамшуренков. М., Изд-во АН СССР, 1963.

Геронимус Я. Л. Очерк о работах корифеев русской механики. М., ГТТИ, 1952.

Голубев В. В. Н. Е. Жуковский. М., 1941.

Голубев В. В. Русские работы по механике и влияние их на развитие мировой науки.— «Ученые зап. МГУ», 1947, вып. 91.

Григорьян А. Т. Очерк истории механики в России. М., Изд-во АН СССР, 1961.

Григорьян А. Т. Механика от античности до наших дней. М., «Наука», 1971.

Гуковский М. А. Механика Леонардо да Винчи. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1947.

Данилевский В. В. Очерк истории техники XVIII—XIX вв. М.— Л., Соцэкгиз, 1934.

Данилевский В. В. Русская техника, изд. 2. Л., Ленгиз, 1948.

Данилевский В. В. Русская техническая литература первой четверти XVIII в. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1954.

Дорогов А. А. Учение о машинах в русской научно-технической литературе периода мануфактурной техники.— «Труды Института истории естествознания и техники», т. 8. М., Изд-во АН СССР, 1956.

Ершов А. С. Об изучении практической механики вообще и механизма машин в особенности.— «Журнал МНП», 1855, № 8.

Ершов А. С. О высшем техническом образовании в Западной Европе. М., 1857.

Ершов А. С. О значении механического искусства и о состоянии его в России. М., 1859.

Жуковский Н. Е. Некролог и очерк научной деятельности Ф. Е. Орлова.— В кн.: Памяти Федора Евграфовича Орлова. М., Политехническое о-во, 1892.

Загорский Ф. Н. Л. Ф. Сабакки — механик XVIII в. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1963.

Загорский Ф. Н. Очерки по истории металлорежущих станков до середины XIX в. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1960.

Зворыкин А. А., Осмолов Н. И., Чернышев В. И., Шухардин С. В. История техники. М., Соцэкгиз, 1962.

Зейлигер Д. Н. Очерк развития механики в текущем столетии. Казань, 1898.

Зомбарт В. Техника эпохи раннего капитализма. Пер. с нем. М., ГИЗ, 1925.

Зубов В. П. Леонардо да Винчи. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1961.

История механики с древнейших времен до конца XVIII в. Под ред. А. Т. Григорьяна и И. В. Погребысского. М., «Наука», 1971.

История механики с конца XVIII в. до середины XX в. Под ред. А. Т. Григорьяна и И. В. Погребысского. М., «Наука», 1972.

Кирпичев В. Л. И. А. Вышнеградский как профессор и ученый. Спб., 1895.

Кирпичев В. Л. Значение фантазии для инженеров.— «Изв. Киевского политех. ин-та», 1903, кн. 3.

Конфедератов И. Я. Джеймс Уатт — изобретатель паровой машины. М., «Наука», 1969.

Космодемьянский А. А. Очерки по истории механики. М., «Просвещение», 1964.

Космодемьянский А. А. Теоретическая механика и современная техника. М., «Просвещение», 1969.

Космодемьянский А. А. Н. Е. Жуковский. М., «Просвещение», 1969.

Костомаров В. М., Бурзавиц А. Г. Основоположник теории гидравлического трения в машинах Николай Павлович Петров. М., Машигиз, 1952.

Крагельский И. В., Шедров В. С. Развитие науки о трении. М., Изд-во АН СССР, 1956.

Кудрявцев П. С., Конфедератов И. Я. История физики и техники. М., «Просвещение», 1965.

Ларионов А. М. История Института инженеров путей сообщения за первое столетие его существования. Спб., 1910.

Лигин В. Н. Очерк новых воззрений Рело на машину. Одесса, 1878.

Лигин В. Н. Научная деятельность Мишеля Шаля. Одесса, 1881.

Максвелл Д. К., Вышнеградский И. А., Стодola А. Теория автоматического регулирования. Ред. и коммент. А. А. Андропова и И. Н. Вознесенского. М., Изд-во АН СССР, 1949.

Маркевич А. И. Двадцатилетие Императорского Новороссийского университета. Одесса, 1890.

Моисеев Н. Д. Очерк развития механики. М., Изд-во МГУ, 1961.

Ольшки Л. История научной литературы на новых языках, т. 1. Литература техники и прикладных наук от средних веков до эпохи Возрождения. Пер. с нем. М.—Л., ГТТИ, 1933.

Орлов Ф. Е. Дневник заграничной командировки 1869—1872 гг. М., 1898.

Повстенко В. В. Праці М. Шаля з кінематичної геометрії.— В кн.: Нариси з історії природознавства і техніки, вып. XX. Киев, «Наукова думка», 1975.

Погребынский И. Б. От Лагранжа к Эйштейну. Классическая механика XIX в. М., «Наука», 1966.

Прокофьев В. И. Московскому высшему техническому училищу 125 лет. М., Машигиз, 1955.

Прокофьев В. И., Савелова А. А. Роль Московского высшего технического училища в развитии теории механизмов и машин.— В кн.: Вопросы теории механизмов и машин (125 лет МВТУ). М., Машигиз, 1955.

Прокофьев В. И. Профессор А. С. Ершов.— «Труды Института истории естествознания и техники», т. 8. М., Изд-во АН СССР, 1956.

Прудников В. Е. П. Л. Чебышев, ученый и педагог, изд. 2. М., «Просвещение», 1964.

Путята Т. В., Фрадлин Б. Н. Діяльність видатних механіків на Україні Київ, Держтехвидав УРСР, 1952.

Раскин Н. М. Иван Петрович Кулибин. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1962.

Савельев А. Исторический очерк инженерного управления в России. Спб., 1879.

Сидоров А. И. Очерки по истории техники, вып. 1—2. М., Гостехиздат, 1925—1928.

Старосельская-Никитина О. А. Очерки по истории науки и техники периода Французской буржуазной революции 1789—1794 гг. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1946.

Тартико С. А. Розвиток графічних методів розрахунку маховиків в XX ст.— В кн.: Нариси з історії природознавства і техніки. вып. XIX. Киев, «Наукова думка», 1974.

Тартико С. А. Розвиток графічних методів розрахунку маховиків в XIX ст.— В кн.: Нариси з історії природознавства і техніки, вып. XX. Киев, «Наукова думка», 1975.

Тартико С. А. Развитие графических методов кинетостатического анализа механизмов в XIX ст.— В сб.: Теория механизмов машин, вып. 20. Харьков, Изд-во ХГУ, 1976.

Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов. М., ГТТИ, 1957.

Тюлина И. А., Чиненова В. Н. Основные понятия кинематики в книге Э. Бура «Курс механики машин».— В сб.: «Проблемы истории математики и механики». Под ред. С. С. Демидова и И. А. Тюлиной, вып. 1. М., Изд-во МГУ, 1972.

Уварова Л. И. Развитие средств передачи механической энергии. М., Изд-во АН СССР, 1960.

Чебышев П. Л. Полное собрание сочинений, т. V. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1951.

Шухардин С. В. Основы истории техники. М., Изд-во АН СССР, 1961.

Alt H. Ludvig Burmester.— «Maschinenbau», 1937, Bd. 16, S. 41.

Alt H. Martin Grübler.— «Maschinenbau», 1935, Bd. 14, S. 404.

Armitage W. H. G. A social history of engineering. London, 1961.

Ashby E. Technology and academies. London, 1958.

Babbage Ch. On the economy of machinery and manufactures. London, 1832.

Beck Th. Über den Begriff «Maschine».— «Civilingenieur», 1877, Bd. XXIII, S. 411.

Bell E. T. Men of Mathematics. N. Y., 1937.

Bell E. T. The Development of Mathematics, 2 ed. New York — London, 1945.

Biot J.-B. Essai sur l'histoire générale des sciences pendant la Révolution française. Paris, 1803.

Davies M. An outline of the development of science. London, 1947.

Dickinson H. W. James Watt, craftsman and engineer. Cambridge, 1936.

Dickstein S. Hoene Wronski, jego życie i prace. Lwów, 1896.

Dugas R. Histoire de la mécanique. Paris, 1950.

Duhem P. Les origines de la statique. Paris, 1905.

Feldhaus F. Leonardo der Techniker und Erfinder. Jena, 1913.

Federhofer K. Dem Schöpfer der graphischen Dynamik Ferdinand Wittenbauer.— «Maschinenbau», 1936, Bd. 15, S. 465.

Ferguson E. S. Kinematics of mechanisms from the time of Watt.— «US National Museum», Bull. 228. Washington, 1962.

Girvin H. F. A historical appraisal of mechanics. Scranton, 1948.

Grashof F. Redtenbachers Wirken zur wissenschaftlichen Ausbildung des Maschinenbaues. Heidelberg, 1886.

Groot J. de. Bibliography on kinematics, v. 1—2. Eindhoven, 1970.

Grübler M. Wandlungen der Kinematik in der Gegenwart.— «Civilingenieur», 1889, Bd. XXXV, S. 219.

Hartenberg R. S., Denavit J. Men and Machines... an informal history.— «Machine Design», 1956, v. 28, N 9, p. 74; N 12, p. 101; N 14, p. 219.

Kanayama P. Bibliography on the theory of linkages.— «Tohoku Math. J.», 1933, v. 37, p. 294.

Kirby, Withington, Darling, Kilgour. Engineering in History. N. Y., 1956.

Klemm T. Technik, eine Geschichte ihrer Probleme, München, 1954.

Launau L. de. Un grand Française, fondateur de l'Ecole polytechnique. Paris, 1933.

Lorenz H. Die Mechanik in ihrer Bedeutung für den Maschinenbau.—
«Zeitschrift des VDI», 1906, Bd. 50, S. 651.
Lübke A. Die Uhr. Von der Sonnenuhr zur Atomuhr. Düsseldorf, 1958.
Matschoss G. Männer der Technik. Berlin, 1925.
Matschoss G. Grösse Ingenieure. München, 1954.
Medici M. La tecnica dalle origine al novecento. Milano, 1958.
Mises R. von. Dynamische Probleme der Maschinenlehre, historischer
Übersicht.—«Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften»,
Bd. IV, T. 10. Leipzig, 1901.
Mumford L. Technics and civilization. N. Y., 1934.
Redtenbacher F. Geistige Bedeutung der Mechanik und geschichtliche
Skizze der Entdeckung ihrer Principien.— In: Redtenbacher R.
Erinnerungsschrift. München, 1879.
Reuleaux F. Über die Definition der Maschine.—«Civilingenieur»,
1877, Bd. XXIII, S. 563.
Reuleaux F. Kurzgefasste Geschichte der Dampfmaschine. Braunschweig, 1891.
Rittershaus T. Zur heutigen Schule der Kinematik.—«Civilingenieur»,
1875, Bd. XXI, S. 425.
Rousseau P. Histoire des techniques. Paris, 1956.
Rühlmann M. Vorträge über Geschichte der technischen Mechanik und
der damit in Zusammenhang stehenden mathematischen Wissenschaften,
Bd. I. Leipzig, 1885.
Sarton G. The History of science and the new humanism. N. Y., 1931.
Schoenflies A., Grübler M. Kinematik.—«Enzyklopädie der mathematischen
Wissenschaften», Bd. IV, T. 3. Leipzig, 1901.
Singer Ch., Holmyard E. I., Hall A. A., Williams T. I. A History of
technology, v. 1—V. Oxford, 1954—1958.
Straub H. Die Geschichte der Bauingenieurkunst. Basel, 1940.
Uccelli A. Storia della tecnica dal medio evo ai nostri giorni. Milano,
1945.
Vaes F. J. Geschiedenis van een onderdeel der mechanica.—«Polytechnisch
Weekblad», 1935, bd 29, s. 731, 744, 759, 774.
Vierendeel. Esquisse d'une histoire de la technique. Bruxelles, 1921.
Weihe G. Franz Reuleaux und seine Kinematik. Berlin, 1925.
Wittenbauer F. Zukunft und Ziele der technischen Mechanik. Graz,
1911.—«Zeitschrift des VDI», 1912, Bd. 56, № 26, S. 1021.
Zischke A. Vom Tretrad zur Atomenergie. Gütersloch, 1959.

УКАЗАТЕЛЬ ИМЕН

Август 13
Авиценна (см. Ибн Сина)
Агрикола (Георг Бауэр) 35, 36
Александр I 115
Александр Македонский 5, 7,
16, 25
Альберт Саксонский 26
Альберти Л. Б. 30, 31, 32, 34
Альбицкий В. И. 437
Альви Л. 382, 416
Амонтон Г. 52, 54, 78
Ампер А.—М. 144, 145, 146,
147, 180, 230, 315
Андреев К. А. 367
Андронов А. А. 362
Андрье 167
Антонов А. М. 280, 452
Анфимий Тральский 16
Араго Д. Ф. 91, 92, 107, 168,
177
Аристотель 7, 17, 27
Аркрайт 57
Аронгольд З. 269, 286, 304, 307,
320, 334, 378
Артоблевский И. И. 264, 265,
300, 343, 433, 435, 447, 448
Архимед 8—11, 14, 15, 18, 367
Архит 9
Ассур Л. В. 347, 415, 424, 426,
443, 445—449
Астров А. И. 433
Ахадова М. А. 17
Ашетт Ж. Н. 107, 108, 110, 117,
118, 125, 127—129, 133, 135,
136, 138, 139, 156, 167, 168,
185, 225, 246, 281, 330, 387
Байрон (Ловлейс) А. 186
Байрон Дж. Г. 186
Барлетт У. 292
Барроу И. 43
Батищев Я. 74
Баумгартнер А. 207, 208
Бауэр Г. (см. Агрикола)
Бах К. 322, 384
Баббидж Ч. 185—186, 273
Бабель А. 302
Безу Э. 101
Бек Т. 311—313, 382, 401, 402
Бекон Р. 23, 27, 42
Бекон Ф. 42
Беланже Ж. Б. 196, 244, 276—
279
Белелюбский Н. А. 371
Беллавитис Дж. 286, 339
Белидор Б. 67—69, 84, 85, 92,
93, 159, 160, 225
Бельский Г. Л. 37
Берд Ч. 221, 228
Беннет Д. Т. 421
Бентковский И. И. 445
Бернулли Д. 75, 76, 85
Бернулли И. 67, 68, 76, 85
Бернулли Н. 75
Бернулли Я. 75
Бертело М. П. Э. 106
Бертран Ж. Л. 336, 394
Бетанкур А. А. 106, 107, 110—
118, 120, 125, 126, 128,
146, 160, 184, 192, 204, 220,
222, 225, 266, 277, 330
Бетховен 216
Бион Н. 56
Бирингуччо В. 35
ал-Бируни Абу Рейхан 17
Блюментрост Л. Л. 74, 75
Бобыль Е. 177, 325, 287
Бобылев Д. К. 225, 341, 444
Богран 48
Божерянов Н. Н. 94, 238
Болл Р. 357, 406
Болтон М. 152

Бооль В. Г. 265
 Борда Ж. Ш. 84, 85
 Борис Годунов 37
 Борнии Д. А. 131—139, 169, 174, 191, 192, 203, 225, 237, 241, 273
 Боссу Ш. 85
 Брама Дж. 151, 182
 Бранка Дж. 52
 Брашман Н. Д. 232, 243, 244, 255, 256, 266, 332, 334, 424
 Бреге Л. А. 120, 121, 125
 Бресс Ж. 284, 336
 Брунеллески Ф. 30
 Бруно А. А. 301
 Брюстер Д. 184
 Будаев Н. С. 231
 Бульвен Ж. 387, 388
 Буняковский В. Я. 233, 234, 265
 Бур Ж. 276, 282, 431
 Бург А. 209, 383, 393
 Буридан Ж. 26, 27
 Бурместер Л. 320—322, 324—329, 347, 357, 377, 400, 406—408, 423
 Вариньон П. 268
 Вейсбах Ю. 208, 212—215, 249, 383, 402
 Веллингтон 182
 Вероккьо А. 33
 Вестингауз Д. 291
 Вибе К. 334, 383
 Виллар де Гоннекур 23, 24, 30
 Виллис Р. 188—192, 194—196, 198, 200, 201, 203, 243, 245, 247, 248, 273, 275, 276, 278, 279, 281, 283, 316, 330, 356, 371, 390, 419, 421, 428, 431, 434, 440
 Вилькинсон Дж. 58
 Виолле ле Дюк Э. Э. 23
 Виргилий 76
 Виргинский В. С. 453
 Висковатов В. И. 113
 Витворт Дж. 151, 182
 Витрувий М. 12—14
 Виттенбауэр Ф. 378, 379, 381, 390, 391, 408—412, 423, 428, 429, 435
 Вобан С. 83, 327
 Вознесенский И. Н. 362, 387
 Вокансон Ж. 57, 61, 139
 Вольтер 86
 Вольф Х. 70
 Воронеж П. В. 441
 Воронин М. И. 233
 Ворчестер Э. 52, 185
 Вышнеградский И. А. 232, 334, 358—363, 366, 367, 371, 386, 387, 429
 Гагарин Е. И. 453
 Галилей Г. 41, 42, 45, 48, 54
 Гамильтон В. 339
 Гарвей В. 45
 Гарт Г. 299, 369
 Гартинг Э. К. 402
 Гартман В. 410
 Гатон де ла Гупийер Ж. Н. 276, 279—281, 286, 336
 Гвин С. 62
 Гейуорд 284
 Гене-Вронский Ю. М. 143, 144
 Гениво 157—159
 Гераклит Эфесский 7
 Герберт Орилакский (Сильвестр II) 19
 Герард Брюссельский 26
 Герики О. 42
 Герман Г. 380
 Герман Я. 75, 81, 164
 Герон Александрийский 10—12, 15, 17, 383
 Герон Младший 15
 Гиббс Дж. У. 292
 Глинков Р. 74, 220
 Гнеденко Б. В. 264
 Гоголь Н. В. 235
 Голубев В. В. 365, 366, 426, 427
 Гопкинс Д. 295
 Горев А. А. 445
 Горячкин В. П. 424, 449—451
 Гохман Х. И. 351—356, 371, 398, 400
 Грасгоф Ф. 316—319, 327, 336, 343, 354, 384, 400, 412
 Грдина Я. И. 429, 443
 Грегори О. 184, 185, 290
 Гречанинов А. В. 385
 Гриз Р. (Грыз) 62
 Грин 62
 Гриневецкий В. И. 430
 Гроте 35
 Груар 347
 Грюблер М. 315, 323, 324, 263, 264, 343, 400, 408, 409, 423

Гудде И. 43
 ал-Гузули 18
 Гук Р. 43, 44, 49—52, 54, 120, 174, 433
 Гурьев С. Е. 113
 Гутенберг И. 28
 Гутьяр Е. М. 435
 Гюйгенс Хр. 43, 48, 50, 52

Давидов А. Ю. 232, 243, 334
 Даймлер Г. 373
 Д'Аламбер Ж. Л. 79—81, 103, 131, 156, 157, 175, 375—377, 414, 435, 444
 Дамблтон Дж. 26
 Даниельсон Н. Ф. 373
 Данилевский В. В. 63
 Дарбу Ж. Г. 393, 394, 425, 426
 Двельсхаверс-Дери В. 263, 302, 314
 Дезарт Ж. 49, 39
 Декарт Р. 43, 45—49, 61, 66, 260
 Делла-Вос В. К. 335
 Делоне Н. Б. 426, 441—443
 Делоне Ш. Э. 175, 301
 Демокрит Абдерский 7
 Десалийер 92
 ал-Джазари И. 18
 Дженкин Ф. 375
 Джулио К. 203—205, 286
 Дидро Д. 81, 82
 Добровольский В. В. 434
 Доброшавов А. Г. 238
 Дорогов А. А. 454
 Досифей (Немчинов) 37
 Достоевский Ф. М. 250
 Драпье 270
 Дубяга К. М. 445
 Дюамель Ж. М. К. 174
 Дюпен Ш. 107, 139, 154—156
 Дюрер А. 30, 32

Евневич И. А. 358, 370
 Евреинов 222
 Ермаков В. П. 441
 Ершов А. С. 114, 243—249, 334, 429

Жаккард Ж. М. 130
 Жильбер Ф. 287
 Жирар Ф. А. 130
 Жиро Ш. 196, 276
 Жмурко Л. 301

Жонваль 360
 Жордан М. Э. К. 349
 Жуковский Н. Е. 231, 232, 336, 337, 376, 385, 389, 423—429, 432, 434, 435, 437—439, 442, 446, 450
 Журавский Д. И. 371

Занчевский И. М. 351, 356, 357
 Зальценберг Н. 211
 Захава П. 74
 Зейлигер Д. Н. 351, 357, 358, 443, 447
 Зенон Элейский 7
 Зернов Д. С. 367, 430, 431, 437—439, 443, 444
 Зомбарт В. 454
 Зоммерфельд А. 385, 386
 Зубов В. П. 32

Ибн Сина (Авиценна) 17
 Иванс О. 291, 428
 Ивон-Вильярсо А. Ж. Ф. 176
 Имшенецкий В. Г. 336, 339, 436
 Иоанн Филопон 16, 17, 26
 Исидор Милетский 16
 Итон А. 290

Кавальери Б. 43, 48
 Кайзер Е. 211
 Камю Ш. 69, 84, 92
 Канкрин Е. Ф. 223
 Кант И. 95, 96, 102, 143
 Кардано Дж. 38, 51, 61, 117, 369
 Карно Л. Н. 62, 87—92, 102, 103, 156
 Картрайт 57
 Катон Старший 13
 Кей Д. 57
 Кемпе А. Б. 47, 295, 299, 374, 375, 399, 412
 Кенингс Г. 394—400
 Кеннеди А. Б. В. 310, 320—322, 330, 341
 Кеплер И. 42, 43, 50
 Кербедз С. В. 232—234, 250, 257, 371
 Кестнер Г. 380
 Кирпичев В. Л. 358—360, 363, 366—370, 437, 438, 441, 443, 444, 448
 Клапейрон Э. К. 114, 229, 369
 Классен Е. И. 241, 242

- Клейн Ф. 296, 406
Клеман 156
Клемент Дж. 151
Клеро А. К. 69, 167
Клиффорд У. 356, 357
де Ко С. 52
Ковалевский В. И. 429
Колосов Г. В. 341
Колумб Хр. 32, 33
Колчин Н. И. 221
Колычев Ф. 37
Конфедератов И. Я. 67
Коперник Н. 41, 42
Кориолис Г. 136, 156, 161, 164—167, 173, 175, 214, 328, 380
Кормик С. М. 289
Космодемьянский А. А. 445
Костер 50
Котельников А. П. 357, 439
Котельников Н. Е. 439
Коши О. 164, 165, 177, 178, 181, 230
Крафт Н. О. 234
Крагельский И. В. 455
Крелье 406
Кремона Л. 268, 269
Кристиан Ж. Ж. 139—143, 225, 241, 259
Кромптон 57
Кроу М. 348
Крылов А. Н. 258
Ктесибий 10
Кузнецов Е. Г. 74
Кулибин И. П. 59, 60, 74
Кудон Ш. 62, 84, 86, 91, 124, 156
Кульман К. 268, 304, 378
Куприн А. И. 368
Кутузов М. И. 114
Кэйли А. 256, 286, 294—296, 301
Лабулэ Ш. 196, 264, 274—276, 281—283
Лаваль Р. Г. 367, 372
Лагир Ф. 49, 50, 69, 83, 84, 120, 325, 369
Лагранж Ж. 97, 131, 156, 158, 163, 170, 203, 205, 414, 428
Ламарль Э. 287
Ламберт 83
Ламе Г. Ф. 114
Ламетри Ж. О. 61
Лангсдорф К. Х. 211
Ланц Х. М. 107, 110, 111, 113, 117, 118, 125, 126, 128, 146, 160, 184, 192, 204, 225, 277, 330
Лебедев Д. Н. 334
Лев Математик 16
Леви М. 287, 323, 393, 425
Левитский Н. И. 425
Лежандр А. М. 167
Лейбензон Л. С. 337
Лейбниц Г. 44, 51, 52, 164, 265
Лейпольд Я. 64—68, 83, 103, 117, 136
Лекорню Л. 387, 418—420, 428
Лемуан Э. 297
Ленин В. И. 105, 221
Леонардо да Винчи 30, 32—35, 39, 52, 61, 117
Леоте А. 387, 393
Лешателье Л. 176
Лигин В. Н. 286, 301, 310, 347—351, 357, 371, 442
Липкин Л. И. 258, 295—299, 302, 428
Линен В. 408, 409
Лодыгин А. Н. 371
Ломоносов М. В. 63, 70, 82, 83, 112
Лонгфелло 305
Лопиталь Г. Ф. 164
Лоренц Г. 382, 413, 414
Лулль Рамон 25
Любимов Н. А. 244
Ляпунов А. М. 339, 367, 436
Магницкий Л. Ф. 62, 63
Майоров А. И. 113
Мак Кей 421, 422
Мак Корд 330
Маклорен К. 84, 85
Максвелл Д. К. 268, 269, 360, 362, 387
Маннгейм А. 269, 285—287, 406
Манту П. 57
Мануйлов А. А. 429
Марикур П. (Пьер Перегрин) 23
Мариньяно 39
Мариотт Е. 84
Маркевич А. И. 455
Маркс К. 38, 41, 54—58, 71, 72, 134, 149—151, 213, 271—273
Марриль А. Л. 422
Масанов Ю. И. 235
Мебиус А. Ф. 339
Мельников П. П. 233, 234, 266, 299
Мемке Р. 324
Менделеев Д. И. 371
Меньшиков А. Д. 63, 75
Мерсенн М. 44, 47, 48
Мерцалов Н. И. 416, 424, 428, 429, 432—435, 437, 446, 451
Мец А. 19
Мещерский И. В. 341, 444, 445
Мизес Р. 412
Миткевич В. Ф. 445
Модсли Г. 58, 151, 152, 182, 187
Мозель 245
Моисеев Н. Д. 81, 455
Молль 304
Моляр 90
Монгольфье 119
Монж Г. 32, 62, 66, 87, 96, 100—107, 110, 114, 117, 125—127, 133, 136, 137, 139, 154, 156, 167, 169, 184, 191, 195, 203, 224, 225, 241, 242, 247, 268, 273—275, 356, 392, 395, 403
Монж Ж. 100
Монж Л. 100
Монтюкла Ж. Е. 97
Мопертюи П. Л. М. 69
Мор О. 321—324, 377, 380, 407, 408, 411, 413, 416, 423
Морен А. Ж. 175, 214, 244, 374, 375
Мослема ал-Махриси 19
Моцци Д. Д. 80
Мстиславец П. 29
Мухелишвили Н. И. 341
Мусхенбрук (Мушенбрук) П. 92
Мэрдок 182
Мюль Д. 119
Навье Л. М. 156, 159, 173, 229, 245, 249, 259, 304
Наполеон 87, 99, 100, 106, 107, 112, 130, 167, 201, 206, 210, 250
Нартов А. К. 56, 151
Нейбер Ж. 394
Нечаев А. И. 440
Николай Е. Л. 445
Николайдес 285
Николай Кузанский 29
Никольсон Н. 187
Никомед 10
Ниман М. 313, 314
Ньюкомен Т. 57, 93, 94, 260
Ньютон И. 43, 44, 49, 51, 58, 54, 75, 84—86, 197, 268, 364, 438, 441
Окатов М. Ф. 341
Оккам Г. 26, 380
Оливье Т. 178, 179, 244, 259, 281, 282, 284, 316, 353
Орем Н. 27
Орлов Ф. Е. 278, 279, 305, 334—338, 425
Оссовский М. 220
Островский А. Н. 229
Остроградский М. В. 229—233, 234
Осьмова Н. И. 454
Отто Н. 373
Памбург 529
Папен Д. 52, 54, 93
Паран А. 84, 85, 92, 93
Парсонс Е. 372
Паскаль Б. 42, 47, 48, 50, 227, 369
Пекарский П. П. 61
Пенлеве П. 420
Петерсен 287
Петр I 56, 61, 62, 64, 68, 74, 75
Петров Н. П. 232, 363—367, 371, 385, 386
Пикар Ш. Э. 394
Пиккард Д. 59
Пипеляр П. 27
Платон 5, 9
Плиний Старший 13
Плутарх 8, 9
Погребынский И. Б. 76, 232
Ползунов И. И. 57, 74
Понселе Ж. В. 62, 136, 139, 156, 161, 165, 167—175, 180, 195, 213, 225, 235, 237, 244, 245, 249, 259, 268, 277, 283, 292, 308, 309, 312, 369, 380, 392
Порошин С. А. 76
Портер 375, 381, 411
Прелль Р. 321, 322, 324, 376, 377, 378, 380, 413
Прокл 10
Прони Г. К. Ф. 83, 139, 156, 157, 167
Проскура Г. Ф. 457
Прудников В. Е. 455
Пти А. Т. 125, 159, 160

Пуанкаре А. 387, 392, 393
 Пуансо Л. 161, 163, 164, 170, 230, 279, 283
 Пуассон С. Д. 161—163, 164, 167, 175, 230
 Поппе Г. М. 210
 Поселье Ж. Н. 283, 295—299, 369
 Путята Т. В. 443

Радингер И. 375, 380, 381, 411
 Раддиг А. А. 440, 441, 443, 447
 Рамелли А. 39—41, 117
 Ранкин М. 195, 197—199, 268, 330
 Раскин Н. М. 60
 Рахманинов И. И. 312, 333, 338, 339
 Редтенбахер Ф. 207, 208, 215—218, 303, 305, 313, 317, 359, 363, 383
 Реааль А. 284, 315, 339, 340, 349, 425
 Рейнольдс О. 385
 Рело Ф. 134, 136, 137, 187, 208, 218, 235, 269, 275, 278, 313—317, 319, 320, 325, 330, 334—336, 338, 339, 343, 349, 350, 352, 388, 390—392, 395, 396, 400—405, 410, 414, 417, 421, 428, 434, 439
 Ремер О. 49, 50
 Рен Хр. 48
 Ренни Дж. 150
 Реомюр Р. А. 82
 Рерих К. Э. 443—445
 Рикардо 150
 Риттерсхаус Т. 310, 311, 313, 314, 323, 324, 402
 Риччи М. 43
 Роберваль Ж. П. 48, 369
 Робертс С. 264, 300, 327
 Робисон Дж. 183
 Родриг Б. О. 181
 Рузский А. П. 428—440, 443
 Рюльман М. 213, 382, 383

Сабит ибн Корра 18
 Савари Ф. 93, 133, 177, 182, 431
 Савельев А. И. 68
 Салтыков-Щедрин М. Е. 115, 250
 Севери Т. 52
 Сегнер Я. А. 80, 241

Сей Ж. Б. 150
 Сидоров А. И. 34, 216, 270, 271, 430, 432
 Сидоров М. В. 74
 Сильвестер Дж. Дж. 256, 292, 294—298, 300, 323, 369, 399, 400
 Скорина Ф. 29
 Скорняков-Писарев Г. Г. 63
 Смирнов Л. П. 430, 432
 Смирнов Н. П. 358
 Смит Р. 321, 322, 325, 377, 421
 Смитон Дж. 69, 70, 156, 182
 Соболевский П. Г. 222
 Соколов И. Д. 249, 436
 Соколов Н. М. 240
 Сомов О. И. (И. И.) 225, 265, 266, 286, 329, 339—342, 349
 Сомов П. О. 301, 326, 340, 341, 343—348, 357, 371, 398, 400
 Стевенс 330
 Стеклов В. А. 339, 367, 436
 Стефенсон Дж. 153, 154, 200
 Стефенсон Р. 152, 154, 176
 Стодола А. 360, 362, 386, 387
 Стокс Д. 364
 Столяров Я. В. 437
 Струмилин С. Г. 219, 252
 Суайнсхед Р. 26
 Суслов Г. К. 341, 441, 442
 Схоотен Ф. 51

Таклинский В. В. 445
 Тарик 17
 Тарле Е. В. 150
 Тарталья Н. 38
 Тейлор 381
 Таубелес И. 324
 Тельфорд 183, 184
 Теркем 285
 Тиме И. А. 213
 Тимошенко С. П. 184, 440
 Тихомандрицкий М. А. 367
 Толле 387, 428
 Томас 313
 Томсон В. 317
 Торричелли Э. 42, 48
 Трансон А. 182, 284, 285
 Трдат 16
 Тревитик Р. 152, 153
 Тредгольд Т. 189, 190, 214, 282
 Третер С. 330
 Тудоровский А. И. 445
 Тэт Т. 195—197

Уайт 179
 Уатт Дж. 55—59, 67, 94, 95, 111, 117, 124, 152, 173, 179, 182, 260—262, 282, 296—298, 314, 361, 362, 428
 Уитни Э. 291
 Уозбру М. 94
 Уэвелл У. 188, 191

Фалес Милетский 7
 Фарварсон 62
 Федоров Иван 29
 Фелинский М. И. 434
 Фейрберн У. 195, 198, 200, 201, 249
 Федерман Л. К. 445
 Феппл А. 322
 Фергюсон Л. С. 330
 Ферма П. 43, 48
 Филиппс Э. 283, 394
 Филон Византийский 10, 17
 Филопон 16
 Фильд 151, 187
 Фитиджеральд К. 94
 Фишер О. 405
 Фонтана Д. 52
 Форменти 287
 Фрадлин Б. Н. 443
 Франкер 225
 Фрейман Л. С. 76
 Фридман А. А. 341
 Фролов К. Д. 74, 85, 291
 Фультон Р. 151, 152, 289
 Фуркруа 103, 167

Хандриков М. Ф. 424
 Харгрэвс Дж. 57
 Хейтесберн В. 26
 Хиттон Ч. 183
 Хойн К. 416
 ал-Хорезми Абу Юсуф 17, 19
 ал-Хорезми Мухаммед ибн-Муса 17, 19
 Хуан Х. 85
 Худяков П. К. 430
 ал-Хурасани Мухаммед 18
 Хэлс Д. 94

Цейнер Г. 304, 322, 324, 330, 376, 384
 Цендрини Б. 86

Чаплыгин С. А. 385—387, 429
 Чебышев П. Л. 95, 232, 243, 248, 255—266, 268, 282, 283, 295—298, 300—302, 314, 322, 323, 328, 333, 334, 338, 339, 341, 343, 354, 365, 369—371, 385—387, 393, 400, 429, 436, 442
 Чернов Д. К. 371
 Чернышев В. И. 454
 Чижов Д. С. 113, 224—229, 233, 266
 Чиненова В. И. 455

Шадвилл И. 326
 Шаль М. 173, 177, 179—182, 269, 283, 284, 286, 336, 349, 444
 Шапталъ Ж. 130
 Шатров В. Д. 445
 Швамб П. 330, 422
 Шевченко Т. Г. 250
 Шелль В. 304, 324, 349
 Шенфлисс А. 416
 Шиккард В. 50
 Шиндлер К. Г. 440
 Шлик Э. О. 381
 Шмидт Е. К. 116
 Штокало И. З. 232

Эберггард И. 70, 71
 Эвдокс 9
 Эйлер Л. 75—81, 83, 84, 86—89, 91—93, 124, 128, 131, 133, 156, 157, 164, 167, 177, 209, 254, 256, 369, 393, 438, 439
 Энгельс Ф. 22, 29, 30, 33, 38, 41, 54, 56—68, 72, 149, 150, 213, 271—273, 302, 303, 373
 Эри Дж. 362
 Этинус 25

Юнг Т. 183

Якоби Б. С. 234
 Ястржембский Н. Ф. 229, 232, 234—238, 250, 253

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Глава первая</i>	
Генезис науки о машинах	3
<i>Глава вторая</i>	
Становление механики машин	55
<i>Глава третья</i>	
Возникновение кинематики	98
<i>Глава четвертая</i>	
Новые направления в механике машин	149
<i>Глава пятая</i>	
Становление исследований в области механики машин в России	219
<i>Глава шестая</i>	
Развитие кинематики механизмов во второй половине XIX в.	267
<i>Глава седьмая</i>	
Развитие механики машин в России	332
<i>Глава восьмая</i>	
Динамика машин в последней трети XIX в.	372
<i>Глава девятая</i>	
Наука о машинах в начале XX в.	390
<i>Глава десятая</i>	
Русская школа механики машин	424
Литература	453
Указатель имен	459

АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ БОГОЛЮБОВ ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН В ИСТОРИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ ЕЕ ИДЕЙ

Утверждено к печати
Научным советом
по теории машин и систем машин
Академии наук СССР

Редакторы Е. М. Кляус, Н. Б. Прокофьева
Художник Э. Л. Эрман
Художественный редактор В. Н. Тихонов
Технический редактор Э. Л. Кунина
Корректор Л. С. Агапова

Сдано в набор 22/IV 1976 г. Подписано к печати 30/VIII-1976 г.
Формат 84×108¹/₂. Бумага типографская № 1.
Усл. печ. л. 24,57. Уч.-изд. л. 25,7.
Тираж 5000. Т-16520. Тип. зак. 635.
Цена 2 р. 04 к.

Издательство «Наука»
103717 ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21
2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10