

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Серия «История науки и техники»

31(10)
Б-116

А. Н. БОГОЛЮБОВ

**МЕХАНИКА
В ИСТОРИИ
ЧЕЛОВЕЧЕСТВА**

С 1431863

С 1431863

ОБЩЕ
научная библиотека
имени А.С. Пушкина



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1978

Книга представляет собой очерки по истории теоретической и прикладной механики. Прослеживается развитие механики от возникновения первых машин до ее современного состояния. Подчеркивается тесная связь и взаимовлияние механики и техники, механики и архитектуры, механики и живописи.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ МЕХАНИКИ

История, которую автор намеревается изложить в этой книге, стара, как мир. Точнее, стара, как человечество, ибо становление человека разумного (*homo sapiens*) связано с осознанием движения и его возможностей. В процессе овладения природой первобытный человек начал проникать в ее тайны, сначала бессознательно, а затем все более и более осознанно воспринимая явления и условия окружающей среды, которые в той или иной мере могли облегчить его существование.

Понимание значения движений, несомненно, связано с применением первых орудий: ведь с помощью палки или камня человек не только удлинил и усилил свои руки. Эти первоначальные орудия побудили его инстинктивно оценивать траекторию движения — путь, который должна пройти конечная точка орудия, чтобы нанести жертве смертельный удар. Естественно, что о науке о движении говорить еще не приходится: на много десятков тысячелетий растягивается период первоначального овладения орудиями, период их непрерывного улучшения и изобретения новых орудий для новых трудовых процессов.

Начальный период предистории человечества называется палеолитом (древним каменным веком), и на него приходится почти 98% всего времени существования человека. Длится он около 500 тыс. лет, а возможно, и больше: последние археологические находки в Африке позволяют предположить, что человек или, точнее, человекоподобное существо появилось 2200 тыс. лет тому назад. За палеолитом следует неолит (новый каменный век) — период, когда каменные орудия подвергаются все более тщательной и разнообразной обработке в зависимости от их назначения. Человек переходит от собирания растений и охоты к культивированию растений и к вы-

ращиванию домашнего скота: начинается оседлая жизнь. Неолит длился 10—12 тыс. лет.

В конце неолита появляются первые города. Около 7 тыс. лет тому назад возникают первые цивилизации на берегах Нила и Тигра и Евфрата, несколько позже — на берегах Инда и Желтой Реки. В V тысячелетии до н. э. начинается плавка бронзы и изготовление бронзовых орудий; в первой половине II тысячелетия до н. э. для изготовления орудий стали применять железо — начался железный век.

Знания и умение, приобретенные человеком в периоды палеолита и неолита, конечно, еще не были наукой: зарождение ее можно отнести к эпохе первых городских цивилизаций и, по-видимому, произошло оно несколько раньше изобретения письменности.

Что же знали о движении в дописьменные времена? Оказывается, не так мало. Люди умели пользоваться рычагом и клином, приспособлениями, без помощи которых нельзя было изготовить никакие орудия; и орудия эти, в сущности, также представляли либо комбинации рычага и клина, либо их варианты. В процессе обработки каменного орудия люди пользовались скалыванием и трением, а позже, уже после освоения бронзы, познакомились с результатами операции сплющивания и узнали, что под влиянием удара можно изменить форму орудия и придать ему желательный вид. Наблюдения за полетом камня или палки, брошенных в нужном направлении, приводят к осознанию зависимости дальности полета от силы броска: с этим связаны изобретения пращи и лука со стрелами. В конструкции стрелы и метательного копья (дротика) уже заложено неясное понятие об устойчивости движения, а в булаве и боевом топоре — оценка значения силы удара. Племенам, стоявшим на очень низкой ступени развития, принадлежит изобретение такого орудия, как бумеранг, сущность которого заключается в соединении силы удара с весьма сложной, наперед заданной траекторией полета.

Очень древними являются зернотерки — возвратно-поступательное движение одного камня относительно другого. Значительно позже появляется зерновая мельница, в которой используется вращательное движение камня: соответствующее механическое приспособление уже в исторические времена, в V—III вв. до н. э., развива-

ется в водяную мельницу — первую машину в мировой истории. Овладение вращательным движением шло, по-видимому, следующим путем: вращение деревянной палочки для получения огня, изобретение гончарного круга, использование круглого бревна при перевозке тяжестей, изобретение колеса, изобретение подъемных приспособлений, блока и ворота. Колесо появляется на рубеже истории, блоками пользовались в Ассирии в VII—VI вв. до н. э.

На протяжении многих тысячелетий охотничьи племена изобретали ловушки для поимки диких зверей, многие из которых представляли собой сложные кинематические цепи, срабатывающие при нажатии на одно из звеньев. Действие токарного станка, изобретение которого теряется в глубине веков, как и изобретение прялки, также основано на понимании и использовании движения.

Явление природы — движение светил и их действительное или кажущееся влияние на судьбы людей, течение воды в реке и его использование для движения плота, прилив и отлив на море, ветер и буря, гром и молния, дождь и засуха — заставляли древнего человека задумываться об их первопричине, чтобы избежать беды или заставить помогать себе. Стремление осознать явления природы и чувство собственного бессилия перед ними привели соответственно к становлению науки и к мифотворчеству.

В период возникновения классового общества, а затем и государства начинается государственно-культовое строительство. Всеобщей известностью пользуются египетские пирамиды, но сооружения подобного типа были и на Крите, в Греции, Сирии, Мексике и во многих других местах. Для всех них характерна доставка издалека камней большого веса, их заготовка, укладка. Древние строители, по-видимому, были знакомы лишь с рычагом, клином и наклонной плоскостью, но пользовались этими приспособлениями сознательно: можно предполагать, что они уже владели начатками механики.

К этому же времени относится появление первых водоподъемных приспособлений: ворота, на барабан которого был намотан канат, несущий сосуд для воды, а также журавля — древнейшего предка кранов и большинства подъемных приспособлений и машин. Ворота представляет собой дальнейшее развитие блока. Значительно

позже была изобретена нория — прообраз современного элеватора.

Итак, к началу последнего тысячелетия до нашей эры народам, населявшим страны Средиземноморского бассейна, были достаточно хорошо знакомы те пять простейших подъемных приспособлений, которые впоследствии получили название простых машин. Приспособления эти сравнивали друг с другом, выбирали наиболее подходящие, комбинировали их соответствующим образом. Начинается рассуждение — первоначальный научный процесс: приспособление рассматривается в отвлечении от его конкретной характеристики.

В сущности, элементы рассуждения у человека были уже тогда, когда он взял в руку камень: различное применение камня и каменного орудия в эпоху палеолита означает, что ум первобытного человека уже обладал возможностью абстрагироваться от несущественных, частных особенностей орудия. Процесс этот был медленным и длился десятки тысячелетий. В эпоху неолита он заметно убыстрился и, наконец, ко времени перехода от обработки бронзы к обработке железа обуславливает становление науки.

Основы современной науки заложили древние греки. Это не значит, что они создали их на пустом месте. Наоборот, как мы уже видели, становление науки представляло собой чрезвычайно длительный процесс: поколения людей буквально по крохам собирали в памяти самое ценное из опыта отцов и дедов и передавали его своим детям и внукам. Но в первобытном обществе не было места для мыслителей: все должны были трудиться, и труд первобытного человека, его борьба за существование были не легкими. В классовом же обществе некоторые его члены — жрецы, чиновники, учителя, не говоря уже о тех, в руках которых была сосредоточена власть, получили возможность не участвовать в физическом труде: у них оказалось время, свободное для размышлений. Наука в древнейших рабовладельческих государствах зародилась сначала как система сокровенных и таинственных сведений, доступных лишь посвященным, а затем и как профессиональное занятие, как средство зарабатывать себе на жизнь. Первыми учеными-профессионалами были философы, и под философией понималась сперва вся совокупность знаний о человеке, о вещах, его

окружающих, о природе и космосе. Первые познания греки заимствовали от египтян и из Месопотамии: недаром первые греческие философы происходили из Малой Азии.

Необходимым условием становления науки оказалось изобретение письменности. Известно, что в Египте и Месопотамии, а возможно, и в других странах восточной части Средиземноморья уже записывались сведения из области наук, таких, как математика, астрономия, медицина, механика, и псевдонаук: астрологии, магии. Человеческая память таким образом была освобождена от тяжелого груза знаний, что положительно повлияло на возможность их дальнейшего развития¹.

И теоретические «знания», и знания с практическим содержанием имеют чрезвычайно древнее происхождение. Только первые с изобретением письменности начали фиксироваться на свитках папируса, на камне или на глине, а прикладные в большинстве случаев остались в устной традиции и записывались лишь изредка. И если теоретические знания, выражавшиеся сперва в рецептурной форме, мало-помалу выработали свой собственный, «научный», способ изложения, то прикладные еще долгие столетия будут придерживаться «рецептуры».

Какие познания из области механики были у древних народов до начала VI в. до н. э.? Это были элементы (пользуясь современной терминологией) гидравлики, строительной механики, статики, динамики и небесной механики.

Практическая гидравлика — управление разливом рек, орошение полей при помощи каналов, учет распределяемой воды, первые водоподъемные приспособления — лежала в основе хозяйственной жизни древнейших культурных стран, поскольку их благоденствие в значительной степени зависело от умения вести водное хозяйство. Орошаемое земледелие увеличивало возможности роста на-

¹ Однако не все думали так. Даже значительно позже описываемого времени великий греческий философ Сократ (469—399 гг. до н. э.) возражал против распространения письменности, указывая на ее опасность, «ибо это изобретение порождает забывчивость в умах тех, кто овладевает им, понуждая их пренебречь своей памятью. Уверовав в силу письма, они будут вспоминать с помощью посторонних знаков, не пользуясь тем даром, который в них заложен».

селения и появления городов. Первые города и необходимость снабжения их водой дали новые темы для размышления древним гидравликам: так, в III в. до н. э. г. Мохенджо-Даро на берегу Инда (современный Пакистан) имел водопровод и прекрасную канализационную систему для отвода дождевой воды со специальными колодцами для стока нечистот.

Познания в области строительной механики обуславливались постройкой крепостей, культовых и жилых зданий: требовалось критическое отношение не только к возводимым конструкциям, но и к материалам. В результате многовекового опыта была осмыслена разница в прочности между камнем, кирпичом-сырцом и обожженным кирпичом, найдена правильная форма высокого сооружения: в начале III в. до н. э. гениальный египетский архитектор Имхотеп создал в Соккаре первую ступенчатую пирамиду.

Древнейшие познания в области динамики связаны с практической механикой охоты и войн. Полет стрелы, полет камня, брошенного пращей, «артиллерийские» орудия — катапульты для метания камней большого веса, баллисты и т. п. побуждали древних механиков задумываться над полетом «снаряда»: он должен был попасть в цель. Имели они некоторые сведения и об относительной упругости материалов: тетива лука и упругие элементы баллист изготовлялись из жил животных, обработанных специальным образом.

Этим не исчерпывались познания древних. Уже египтяне умели управлять силой ветра: паруса их судов постепенно принимают наилучшую форму.

Все эти элементы практической механики послужили базой при становлении механики как науки. Первый из философов, о котором имеются исторические сведения, Фалес, живший в Милете (Малая Азия) в начале VI в. до н. э., был, как сообщает историк Геродот, военным инженером и гидротехником. Он познакомил греков с египетской и вавилонской наукой; в его философии есть элементы рассуждений о сущности движения.

Гераклит Эфесский жил в Малой Азии в начале V в. до н. э. Он утверждал, что в природе нет ничего постоянного и неизменного: все течет! Нам только кажется, что всякий раз мы погружаемся в одну и ту же реку, а на самом деле вода, в которую мы раньше погружа-

лись, давно ушла. Нельзя дважды войти в одну и ту же реку. Мир, единый из всего, не создан никем из богов и никем из людей, а был, есть и будет вечно живым огнем, закономерно воспламеняющимся и закономерно угасающим, — считал он. В. И. Ленин назвал это очень хорошим изложением основ диалектического материализма².

Попытки пояснить движение и его элементы уже в древние времена подвергались критике. Так, Зенон Элейский (510—440 гг. до н. э.) оспорил понятия протяженности и множественности вещей. Он утверждал, что всякий путь бесконечен, ибо прежде, чем его пройти, надо пройти половину пути; прежде, чем пройти половину пути, следует преодолеть четверть пути и т. д. Следовательно, рассуждал он, получается бесконечное число отрезков, каждый из которых имеет некоторую протяженность, что и доказывает (по его мнению) утверждение. В качестве примера Зенон рассматривал соревнование в беге Ахиллеса и черепахи и спрашивал: сможет ли быстроногий Ахиллес догнать черепаху? Пусть Ахиллес, рассуждал он, находится в точке *A*, а черепаха — в точке *B*. Когда Ахиллес прибудет в точку *B*, черепаха окажется уже в точке *C*; когда Ахиллес достигнет точки *C*, черепаха окажется в точке *D* и т. д. Иначе говоря, между Ахиллесом и черепахой всегда будет сохраняться расстояние, и он не сможет ее догнать.

Дело в том, что ряд с бесконечным числом уменьшающихся членов, по мнению древнегреческих математиков, имел сумму членов, равную бесконечности.

Значительно развил учение о движении величайший из греческих материалистов Демокрит (ок. 470 г. — нач. IV в. до н. э.), уроженец малоазиатского города Абдер. Он учил, что материя состоит из атомов, неделимых мельчайших частиц, имеющих разную величину и форму. Атомы движутся в пустоте в различных направлениях и с различными скоростями, но не ускоряясь и не замедляясь, и следовательно, не останавливаясь. Движение атомов извечно, оно не имеет ни начала, ни конца. Таким образом, Демокрит предвосхитил закон инерции; различие было лишь в том, что он допускал не только прямое, но и круговое движение атомов. Однородные

² Ленин В. И. Полн. собр. соч., т. 29, с. 311.

атомы могут действовать друг на друга, притягиваясь или отталкиваясь, но вступать в соприкосновение они не могут. Поэтому толчок, удар, давление являются лишь кажущимися явлениями, обманом наших органов чувств. Движение универсально.

Труд Демокрита по механике сохранился лишь во фрагментах, причем в основном содержащих возражения противников философа. Значительно более полную концепцию механики мы находим в работах великого древнегреческого философа Аристотеля (384—322 гг. до н. э.) — «Физика», «Трактат о небе». Аристотель занимался самой проблемой движений, причем в это понятие включал не только собственно перемену места, но и качественное изменение. В своих рассуждениях он пытается перейти и к количественной оценке. Так, в VII книге «Физики» он формулирует следующий закон: «Если движитель есть α , движимое — β , проходимый путь γ и длительность движения — δ , то та же самая мощность α в течение того же времени продвинет половину груза β на двойное расстояние γ . Она продвинет этот груз на расстояние γ в течение наполовину меньшего времени δ : ибо таким образом сохранится пропорциональность». Однако здесь Аристотель не обходится без оговорки: маленькая мощность не сможет сдвинуть очень большой груз, поскольку тогда один человек смог бы сдвинуть с места целый корабль.

Как видим, наука Аристотеля основана не на опыте, а на рассуждении.

Аристотель различал естественные и насильственные движения. Движение тела под действием силы тяжести он считал естественным, ибо в этом случае тело стремится к своему естественному месту. Движение же камня под действием силы, приложенной к нему, есть движение насильственное. Подъем легких тел вверх является примером естественного движения, ибо их местоположение — на орбите Луны, а естественное местоположение тяжелых тел — в центре Вселенной.

Понятие силы, или мощности (оно окончательно прояснится лишь через две с лишком тысячи лет), у Аристотеля выступает в качестве первопричины движения. Он знает сложение движений по правилу параллелограмма, известны ему понятия скорости и сопротивления среды. Движение он считает вечным, но свойство дви-

жения не присуще материи: оно постоянно поддерживается движителем, и существует первичный движитель, который является первопричиной движения.

Итак, у Аристотеля мы встречаемся не только с причинами и с сущностью движения, но и с некоторыми кинематическими и динамическими характеристиками его. Само по себе кинематическое исследование — донаучного происхождения. Первые же наблюдения небесных тел показали, что существуют неподвижные и подвижные небесные тела; изучение этих тел и их видимых движений и легло в основу астрономии и астрологии (в древности они не различались). Эти первоначальные наблюдения послужили также одной из первопричин становления науки механики.

Первым сочинением (из числа дошедших до нас), в котором было пояснено равновесие тел и которое, таким образом, явилось основополагающим при создании статики, считаются «Механические проблемы», приписанные Аристотелю, но созданные в начале III в. до н. э., т. е. после его смерти, вероятно, одним из его последователей.

В этом сочинении автор, так называемый Псевдоаристотель, исследует простые машины на основании одного принципа, утверждая, что свойства весов приводятся к свойствам круга, свойства рычага — к свойствам весов, а большинство движений механизмов приводится к свойствам рычага. Мощность, или силу, он определяет как произведение веса, или массы, тела (древние не различали этих понятий) на скорость движения.

Псевдоаристотель так оценивает свою работу: «Вызывают удивление те явления, происходящие естественно, причина которых неизвестна, и те неестественные явления, которые производятся для пользы людей техническим искусством. Ибо во многих явлениях природа противодействует нашей пользе. Ведь природа всегда придерживается своего собственного, единственного и простейшего порядка; обстоятельства же, нужные для нашей пользы, весьма различны и изменчивы. Поэтому всякий раз, когда нам приходится делать что-нибудь противоположное стремлению природы, задача становится трудной и требует применения технического искусства. Ту часть этого искусства, которая борется с этими затруднениями, мы называем механикой. Как говорит поэт Ап-

тифон, так и происходит: «Мы побеждаем искусством там, где нас побеждает природа»³.

Влияние идей Аристотеля здесь несомненно, однако интерес автора к механическим искусствам заставляет предположить, что он был жителем Александрии, где к III в. до н. э. техника достигла высокого совершенства.

На протяжении V—IV вв. механическая техника пополняется еще одним изобретением — возникают машины. Первые машины — простейшие водяные мукомольные мельницы — были построены на горных речках Закавказья и Малой Азии⁴. Возникновение мельниц было обусловлено ростом населения и увеличением спроса на муку. Помол зерна, производившийся вручную на зернотерках и ручных жерновах, был одной из самых трудоемких и тяжелых операций того времени. Водяная мельница (рассматриваемая как машина) имела в своем составе энергетический агрегат — водяное колесо, передачу — два цевочных колеса, жестко насаженные на валы, и рабочий орган — жернова. В таком виде, с незначительными улучшениями, водяная мельница дожила до XVIII, а кое-где и до XIX в.

Второе поле деятельности, ставшее основой для возникновения машин, было обусловлено нуждами войны и обороны. Первоначальные простейшие приспособления для метания стрел и камней с течением времени развиваются в довольно сложные военные машины. Древнейшая из них, баллиста, состояла из деревянной рамы и жестко связанных с нею стоек, с которыми были скреплены два пучка скрученных сухожилий. В эти пучки вставлялись рычаги, концы которых оттягивались тетивой, скрепленной с салазками, подвижными относительно рамы. С помощью вброса салазки оттягивались назад, тетива оттягивала рычаги, которые, в свою очередь, еще больше напрягали пучки сухожилий. Когда тетива отпущена, сухожилия, раскручиваясь, резко поворачивали рычаги и тетива метала подвешенный к ней снаряд. Камень весом до 30 кг, брошенный баллистой, пролетал свыше 400 м. В III в. до н. э. баллисты в разных ва-

риантах и моделях были распространены по всему культурному Средиземноморью.

Величайшим математиком и механиком античности был Архимед (287—212 гг. до н. э.), который родился, жил и умер в Сиракузах, важнейшей греческой колонии на восточном берегу Сицилии. Не все его работы дошли до нас, но и то, что сохранилось, является громадным вкладом в сокровищницу человеческой культуры. Он занимался арифметикой и геометрией, вплотную подошел к созданию интегрального исчисления, чем опередил свой век на два тысячелетия, много сделал в механике. Он выяснил принцип центра тяжести, создал строгую систему статики, заложил основы гидростатики. В области практической механики он сделал много изобретений, в том числе планетарий — прибор, показывающий движение небесных светил, винт, усовершенствовал зубчатые колеса, на принципе винта построил водоподъемное приспособление («архимедов винт»), применив его впервые для осушки долины, залитой Нилом. Им было создано много машин, в том числе военных.

Во время осады Сиракуз римлянами (212 г. до н. э.) Архимед руководил обороной города и построил много метательных и иных военных машин, которые нанесли осаждающим весьма ощутительный урон. Архимед не пережил осады: при захвате города он был убит римским солдатом.

«Сам Архимед, — пишет Плутарх, — считал сооружение машин 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 честолюбия 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... Знаменитому и многим любимому искусству построения механических орудий положили начало Эвдокс и Архит, стремившиеся... разрешить те вопросы, доказательство которых посредством одних лишь рассуждений и чертежей затруднительно; такова проблема двух средних пропорциональных... для разрешения которой оба применили механические приспособления, строя искомые линии на основе дуг и сегментов. Но так как Платон негодовал, упрекая их в том, что они губят достоинство геометрии... механика полностью отделилась от геометрии и, сделав-

³ Цит. по кн.: Гукровский М. А. Механика Леонардо да Винчи. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947, с. 34.

⁴ Связь первых машин с водяной мельницей, отразилась и в самом их названии: греческое слово *μηχανή* (дорийское *μηχανή*) означает жернов.

шись одною из военных наук, долгое время вовсе не привлекала внимания философии»⁵.

В 336 г. до н. э. царем Македонии и Греции стал ученик Аристотеля, знаменитый полководец античности Александр (356—323 гг. до н. э.); ему удалось разгромить Персию, захватить Малую Азию, покорить Палестину и Египет, Среднюю Азию и часть Индии. Было создано огромное государство, но оно оказалось недолговечным и после смерти Александра Македонского распалось. Однако на всей захваченной им территории распространилась греческая культура, и греческий язык стал государственным языком, языком науки и культуры в государствах, образовавшихся на развалинах великой империи Александра Македонского. Влияние греческой культуры не исчезло и после того, как все средиземноморские страны подпали под власть Рима: в Восточных провинциях Римской империи продолжал господствовать греческий язык.

Культура, возникавшая в средиземноморских странах, получила название эллинистической (от слова *Ἑλλάς* — Греция). Однако не следует думать, что ее создателями были только греки: рядом с ними жили и работали, выражаясь современным языком, деятели науки и культуры египетского, сирийского, еврейского, халдейского происхождения. Главным центром эллинистической культуры стала Александрия, новая столица Египта.

Механика эпохи эллинизма развивается в основном в прикладном направлении: бурное строительство потребовало создания новых, более мощных строительных машин и более пристального внимания к оценке прочности архитектурных конструкций. Развиваются практическая гидравлика и пневматика, создаются новые механические приспособления, новые военные машины. Заказчиков хватает: наследники Александра Македонского ведут между собой и с сопредельными государствами бесконечные войны, а кроме того, на Средиземном море активно действуют пираты, грабящие прибрежные города. В связи с этим улучшаются городские укрепления, строятся новые крепости, особенное внимание обращается на прочность стен. Самым крупным зданием в Афинах становится Ар-

сенал, в котором были собраны военные машины и корабельное вооружение.

Повысившееся значение механики заставило изменить отношение к этой профессии. Механикой «по совместительству» начинают заниматься архитекторы и военные инженеры. Высокого развития достигла военная техника в Александрии, где Птолеми, правившие Египтом, тратили большие средства на сооружение боевых машин. В середине III в. до н. э. в Александрии учился Филон Византийский, который написал «Свод механики» — одно из первых сочинений по практической механике. Свод состоял из девяти книг (до нас дошли лишь четвертая и пятая): 1) Общие принципы механики; 2) Учение о рычагах; 3) О постройке гаваней; 4) О построении метательных машин; 5) Пневматика; 6) О построении автоматов; 7) Военное снаряжение; 8) О фортификации и осаде городов; 9) Тактика.

Из александрийских механиков наибольшую известность получили Ктесибий и Герон. Ктесибий (II—I вв. до н. э.) был, по-видимому, самоучкой. Основные интересы его лежали в области гидравлики и пневматики; он изобрел поршневой насос, счетчик оборотов, занимался устройствами с применением сжатого воздуха. Герон Александрийский (ок. I в. до н. э.) написал едва ли не больше всех античных ученых по вопросам механики. Его перу принадлежали «Механика», «Книга о подъемных механизмах», «Пневматика», «Книга о военных машинах», «Театр автоматов» и ряд других. До нас дошли лишь немногие из его сочинений⁶.

В Механике Герон изучает простые машины и их комбинации. При этом он пользуется понятием момента, но неизвестно, принадлежит ли оно ему или он заимствовал его у других ученых. Кроме простых машин, он описывает также и некоторые механизмы: системы зубчатых колес, системы блоков, полиспасты. Ему известно влияние силы трения, и он рекомендует при работе со сложными механизмами несколько увеличивать прилагаемые к машинам силы по сравнению с расчетными. Однако численно силу трения он не определяет.

⁵ Плутарх. Сравнительные жизнеописания, т. I. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 391.

⁶ Личность Герона не выяснена до настоящего времени. Есть мнение, что он был учеником Ктесибия, некоторые авторы думают, что Герон жил не в I в. до н. э., а на 100 лет позже — в первом столетии нашей эры.

К наиболее известным изобретениям, описанным Героном, относится эолипил — прообраз паровой турбины, в котором впервые для вращения используется реактивное действие струи пара; «геронов шар» — пневмогидравлический прибор, основанный на действии сжатого воздуха на поверхность воды; еще один пневмогидравлический прибор — «геронов фонтан».

Из героновых «Пневматики» и «Театра автоматов» видно, что гидравлика и пневматика в эпоху эллинизма достигли высокой степени развития.

«Театр автоматов» является описанием целого ряда храмовых и театральных автоматов различного назначения. По словам Герона, «представления автоматических театров пользовались в старину большой любовью, во-первых, потому, что в устройстве их проявлялось много механического искусства, а затем и потому, что и самое представление бывало поразительно. Ибо как раз при устройстве автоматов для различных деталей их приходится применять все отделы механики». Эти слова заставляют думать, что уже во времена Герона автоматы не были новинкой: их строили и раньше — «в старину». А следовательно, «в старину» знали уже многое из механики: ведь для сооружения даже самых элементарных автоматов надо хорошо знать статику простых машин, разбираться в механизмах и их частях, уметь производить вычисления, знать отношения и пропорции. Нужно было разбираться в гидравлике и пневматике, знать свойства сжатого воздуха и пара. Нужно было также уметь работать с упругими и гибкими телами, иметь большую инженерную выдумку и развитое пространственное воображение.

Творчество великих александрийских механиков было в основном направлено на постройку военных машин, на водоподъемную технику и на сооружение малых аппаратов и механических автоматов, где они достигли большого совершенства. Им были известны и механизмы, изобретенные и распространившиеся значительно позже. В частности, Филон применял в своих приборах так называемый «карданов шарнир». Занимались они также механикой-наукой, геометрией и другими отделами математики: для них характерной была связь теории и практики. Последним известным механиком александрийской школы был Папп (III в. н. э.).

Гидравлика в Древней Греции достигла высокого уровня: еще в XIV в. до н. э. на территории Греции строились публичные бани с водопроводом, сложной системой канализации. К 600 г. до н. э. относится первая попытка прорыть канал на Коринфском перешейке, в конце VI в. до н. э. был построен водопровод в Афинах, в V в. до н. э. — в Сиракузах. В 185—147 гг. до н. э. был сооружен канал, соединивший Нил с Красным морем, во II в. до н. э. построен водопровод в Антиохии и Пергаме. Известны крупные мелиоративные работы, которые проводили греческие инженеры. Все это дает основание очень высоко оценивать эллинистическую механику.

К механике эпохи эллинизма примыкает механика Рима и Карфагена. Эти державы боролись за господство на Средиземном море с 264 по 146 г. до н. э. Одним из «идеологов» войны с Карфагеном был Катон Старший (234 — 149 гг. до н. э.), известный своим требованием «*Ceterum censeo Carthaginem delendam esse!*» («А все же Карфаген следует разрушить!»), которым он неизменно заканчивал свои речи в римском сенате. Он оставил сочинение с описанием ряда сельскохозяйственных машин и приспособлений. Достаточно подробные сведения об уровне римской механики можно получить из сочинения «Об архитектуре» Марка Витрувия, архитектора эпохи Августа (I в. до н. э.). Книга X этого трактата посвящена описанию машин и механических приспособлений и их действию. По определению Витрувия, «машина есть 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. Машинами он называет те приспособления, которые требуют для своего приведения в действие большого числа рабочих или большой силы, орудия же приводятся в действие силой одного человека. Витрувий рассматривает подъемные машины, применяемые архитекторами, водоподъемные машины, водяную мельницу. Сравнивая работу мельницы с работой водоподъемного колеса, он пишет: «Таким же способом 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, лежа-

чий, тоже зубчатый, с которым соединены жернова. Так, зубцы барабана, насаженного на ось, толкая зубцы лежащего, приводят жернова во вращение. Из висящего над этой машиной ковша на жернова сыплется зерно, из которого посредством того же вращения получается мука»⁷.

Почти половина X книги трактата, главы 10—16, посвящена описанию военных машин и прочей военной техники. К этому времени военные машины достигли большого совершенства и большого разнообразия. Как правило, работали они за счет энергии, накапливаемой при закручивании упругого элемента, в качестве которого применялись сухожилия животных или волос (большей частью женский, как эпически отмечает Витрувий). Баллисты, катапульты, палинтоны (строившиеся по одному принципу) применялись для метания камней, бревен, стрел. Создавались эти машины в большом количестве, и конструкции их были разработаны весьма тщательно. В качестве основания для расчета брались толщина пучка жил, называемая модулем катапульты, или вес снаряда. Так, например, катапульта «в один талант» (талант — около 26 кг) метала снаряд весом 1 талант; длина ее равнялась 7,6 м, высота — около 7 м. При обороне Сиракуз Архимед строил катапульты «в три таланта», которые метали камни «на одну стадию» — около 185 м.

Иной была конструкция онагра. Он монтировался на колесной повозке, в раме ее закреплялся пучок туго закрученных сухожилий, в петлю которого вставлялся рычаг с подвешенной к нему пращей. При оттягивании рычага вниз с помощью ворота жилы закручивались еще сильнее; когда его отпускали, он резко поворачивался и ударялся о поперечную перекладину, а камень, положенный в пращу, вылетал. Большие онагры метали камни весом до 500 кг на расстояние до 300 м.⁸

Скорпионами назывались машины для метания стрел, построенные по принципу лука. Тетива в них натягивалась с помощью механического приспособления. Диони-

сий Александрийский построил полибол, в котором к скорпиону было добавлено приспособление для быстрой подачи стрел — античный пулемет. Ктезибию принадлежало изобретение аэротона — военной машины, в которой роль упругого элемента играл сжатый воздух.

Не все изобретения оказывались удачными. Греческий архитектор Агесистрат (работу которого использовал Витрувий) считал, что «следует применять прежние полезные изобретения и нет необходимости стараться во что бы то ни стало находить все новое, если только нет желания обмануть людей несведущих, предпочитая показать им призрак вместо истины».

Количество машин, которым располагали воинские части, иногда бывало весьма значительным. Так, при взятии Карфагена в руки римлян попало 476 тяжелых орудий и 2500 скорпионов. По-видимому, изготовление военных машин было первым примером организованного производства в специальных «мануфактурах».

В «Математическом собрании» Паппа Александрийского механике посвящена восьмая книга. Папп называет механику наукой о материи и о природе элементов мира и указывает, что она изучает положение и тяжесть тел, движение их в пространстве, причины естественных и насильственных движений. Он различает теоретическую и практическую механику. К первой он относит результаты, связанные с арифметикой, геометрией, физикой и астрономией; практическая же механика изучает обработку меди, железа, дерева, строительное дело, живопись и прочие ремесла. «Но, — говорит Папп, — поскольку невозможно, чтобы один и тот же человек полностью освоил и обширнейшую область математики и все названные нами искусства, то нужно, чтобы желающий приобрести опыт в последних усвоил необходимое именно для каждой отрасли искусства». Затем он описывает различные механические искусства: военные машины, строительные машины, автоматы и иные механические приспособления.

Учение о центре тяжести Папп излагает по Архимеду и Герону, а также описывает собственные исследования. Особенное внимание он уделяет подъему тел по наклонной плоскости и передаче движения зубчатыми колесами. В частности, доказывает, что скорости вращения двух колес, находящихся в зацеплении, обратно пропорцио-

⁷ Витрувий. Десять книг об архитектуре. Пер. Ф. А. Петровского. М., Изд-во Всесоюз. акад. архит., 1936, с. 199.

⁸ Принцип действия этих древних метательных орудий был положен в основу конструкции минометов, появившихся в первую мировую войну.

илинны числам зубьев и что числа зубьев относятся как диаметры колес. Он решает также задачу об определении диаметра колеса по числу его зубьев и по диаметру и числу зубьев другого колеса, падающего в зацепления с ним.

Ученые-астрономы эпохи эллинизма обладали некоторыми сведениями из области небесной механики, представлявшими собой попытку понять небесные явления. Еще Евдокс (408—355 гг. до н. э.) пояснял движения Солнца, Луны и планет при помощи системы концентрических сфер, в центре которых находилась Земля; каждое из небесных тел вращалось вокруг оси, закрепленной в одной из сфер. Система Евдокса была усовершенствована Гиппархом (190—120 гг. до н. э.). Астроном, геометр и механик эпохи эллинизма Клавдий Птолемей (90—168 гг. н. э.) в сочинении, известном под названием «Альмагест», свел все данные из астрономии и небесной механики в стройную геоцентрическую систему. По Птолемею, в центре системы находится Земля — неподвижный шар, а Солнце, Луна и планеты, кроме общего движения вокруг Земли, имеют еще свое собственное, в противоположном направлении. Все звезды имеют сферическое движение.

Значительные познания в механике, и именно в практической, имели также античные архитекторы. На основании длительного опыта, совершенствовавшегося на протяжении многих поколений, они выработали ряд эмпирических правил, которыми и пользовались в своей практической деятельности. Интересно, что индусские храмы, египетские пирамиды, вавилонский сикуррат и греческие колонны всегда суживаются кверху, как это и положено для сооружения, материал которых работает на сжатие. Историк архитектуры Шуази вычислил допущенное напряжение в камнях перекрытия храма в Карнаке (Египет): в потолочных плитах оно составляет 4 кг/см^2 , в архитравах — 5 кг/см^2 . На допуск таких напряжений не решаются и в наше время. «Многие египетские обелиски опрокинуты и разрушены людской злобой, но ни один из них не опрокинут бурей, и некоторые стоят до сих пор. Следует заметить, что обелиск стоит на своем цоколе совершенно свободно, не будучи прикреплен фундаментными болтами, которых египтяне не знали, без всякого раствора и т. п. ... Я произвел расчет некото-

рых обелисков на опрокидывание сильнейшей бурей и нашел коэффициент устойчивости от 2,5 до 2, как раз то, что допускаем мы и теперь», — пишет А. И. Сидоров⁹. Египетские и греческие колонны строились высотой не более девяти диаметров. Сейчас мы знаем, что за этим пределом начинается опасность продольного изгиба. Древние архитекторы соблюдали это условие. По-видимому, тоже не случайно.

Механика постройки античных кораблей также дает много материала для раздумий. Египтяне, например, не знали шпангоутов, а сшивали корабль, как коробку из досок. Такой корабль в нагруженном состоянии мог переломиться. Поэтому они укрепляли его шпренгелем — толстым канатом из женских волос, прикрепленным к носу и корме корабля и поддерживаемым подпорками. При загрузке носа и кормы (в середине корабля размещались гребцы) шпренгель работал на растяжение и предохранял корабль от поломки. Но так бывало не всегда. При перевозке обелисков наибольшей нагрузке подвергалась средняя часть корабля. В этом случае шпренгель ставился не сверху корабля, а под грузом, и так как он работал не на растяжение, а на сжатие, то делался жестким, из деревянных брусьев. Следовательно, египетские механики прекрасно разбирались в действии сил.

Греческие корабли были иной конструкции: они имели усиленное днище. Строили их однорядными (на 50 пар весел), двухрядными и с большим числом гребцов. Самый большой из греческих кораблей «Александрия», построенный в 264 г. до н. э. для сиракузского царя Гиерона, имел длину около 125 м и приводился в движение силой 2000 гребцов! Скорость греческого корабля достигала 4 узлов, т. е. около 7,4 км/час.

В IV—V вв. н. э. началось великое переселение народов. Около 372 г. в Европу вторглись гунны. Под ударами гуннов германские племена отходили на юг и запад, в пределы Римской империи. В IV в. Римская империя разделилась на Восточную со столицей в Византии (Константинополе) и Западную со столицей в Риме. Западная империя не могла сдерживать сильный напор германских племен и теряла одну провинцию за другой, в 476 г.

⁹ Сидоров А. И. Очерки из истории техники. М., Гостехиздат, 1925, с. 7.

были уничтожены; на ее развалинах возник целый ряд полых и германских государств. Восточная империя просуществовала дольше. До VII в. она владела Балканским полуостровом, Малой Азией, Египтом, ее колонии были в Крыму и на Кавказском побережье. Иногда отвоевывала Северную Африку, иногда и часть Италии. Но с VII в. под напором арабов с востока и славян с севера она мало-помалу теряет свои владения, пока в 1453 г. окончательно не исчезает с карты Европы.

Рабовладельческое общество оказалось в состоянии глубокого кризиса: города пустели, ремесла и торговля замирали. В это время не развивается и наука; в лучшем случае переписываются творения прежних ученых, изредка их комментируют. Много забывается и из практической механики.

ТЕОРЕТИКИ И ПРАКТИКИ— СХОЛАСТЫ И ИНЖЕНЕРЫ

Чтобы установить, какой вклад в механику был сделан в течение 1000 лет, от V до XV столетия, приходится не только знакомиться с тем, что было написано в книгах, но и использовать косвенные источники. Нельзя забывать, что многие сочинения не дошли до нас: были уничтожены случайно или преднамеренно, человеческой глупостью или равнодушием. Поэтому иногда мы знаем, что книга была и что написал ее инженер или ученый, имя которого сохранилось, но самой книги нет. А иногда (и, вероятно, довольно часто) нет и имени автора.

Итак, в 330 г. император Константин перенес столицу Римской империи в город Византию, расположенный на европейском берегу пролива Босфор. Так началась история Византийской империи, подданные которой, чтобы сохранить некоторую связь с римской традицией, называли себя ромеями. Впрочем, государственным языком Византии становится уже не латинский, а греческий.

Уровень познаний в области математики и механики в Византии был относительно высоким: если самостоя-

тельное научное творчество и не поднималось до должной высоты, то сохранялись, а при случае и комментировались сочинения ученых эпохи эллинизма. В Константинополе в большом арсенале Мангана хранилось много мощных военных машин. Византийские механики написали целый ряд сочинений по фортификации и военной технике, автором одного из них был Герон Младший (VII в.). Несколько раньше здесь работал выдающийся математик, оптик и механик Иоанн Филопон (? — ок. 660). Он выступил против мнения Аристотеля, развивавшего его последователями — перипатетиками, что воздух воспринимает импульс, сообщенный брошенному телу, и играет по отношению к нему роль двигателя. Филопон утверждал, что полет в безвоздушном пространстве осуществляется легче, чем в среде воздуха, и, следовательно, импульс сообщается от двигателя исключительно брошенному телу.

В 532—537 гг. два византийских архитектора и механика Исидор Милетский и Анфимий Тралльский построили в Константинополе храм святой Софии с куполом, диаметр которого в основании имел 31,4 м. Византийские архитекторы создали новый тип храмовых сооружений, перекрытых куполом. Купол связывался со стенами или с четырьмя квадратными в плане колоннами при помощи так называемых парусов. При этом вес купола равномерно распределялся на поддерживавшую его конструкцию.

Крупным ученым в области математики и механики был византийский ученый Лев Математик (ок. 815 — ок. 870), армянин по происхождению. С 838 по 840 г. он преподавал в Константинопольском университете, с 863 г. был его ректором. Ему принадлежит автоматическая система механизмов для тронного зала византийского императора: около трона он поставил золотых львов и птиц, которые во время торжественных аудиенций приводились в движение; птицы, кроме того, пели (на «варваров», представлявших императору, это оказывало сильное впечатление). Как видим, Византия сохранила искусство построения автоматов, развитое александрийскими механиками.

В сфере влияния Византийской империи находились ее северо-восточные соседи — Абхазия, Грузия и Армения, которым часто приходилось вести с ней борьбу. По-видимому, самым древним и значительным влияние гре-

ческой культуры было на Абхазов; с Абхазией связана, например, легенда о золотом руне. Уровень пауки и культуры в Грузии и Армении был во всяком случае не ниже, чем в соседствующих эллинистических странах, и не только Византия оказывала культурное влияние на развитие стран Закавказья; совершенно бесспорным является и обратный процесс. Среди деятелей пауки и техники Византии встречаются армянские и грузинские имена.

Техника Закавказья эпохи I тысячелетия была весьма высокой. Здесь были разиты обработка металлов, керамическое и ткацкое производства, обработка кож. По-видимому, первое железо было добыто в армянских горах, на горных речках Закавказья были построены водяные мельницы — первые машины в истории человечества. В Армении был разработан интересный вариант соединения купольных устоев со стенами, учитывавший сейсмические условия страны.

В Грузии особое развитие получило строительство крепостей и оборонных сооружений. Крепости строились с учетом рельефа местности. Сохранившиеся от V—VI вв. грузинские храмы и иные сооружения доказывают не только полную самостоятельность строителей и присущее им высокое чувство красоты, но и их большие познания в механике. Ими были созданы интересные строительные конструкции, учитывающие распределение сил, в частности подковообразные арочные проемы, ряд решений соединения купола с поддерживающими его стенами. Так, в храме Джвари (590—604 гг.) переход от центрального квадрата к барабану купола был осуществлен тремя ярусами тропов (деталей перехода от квадрата к восьмиугольнику, шестнадцатиугольнику и кругу).

В начале VII в. начались завоевательные войны арабов. Меньше чем за 100 лет, к концу 30-х годов VIII в., в состав Арабского халифата вошли огромные страны, принадлежавшие раньше Римской империи и Персидскому государству, — образовалась колоссальная империя, которую населяло множество племен и народов и связующим была лишь религия — ислам и арабский язык, ставший языком государства, науки и культуры.

К книгам в странах ислама относились с пиететом. Халифы собирали большие библиотеки, в которых бывало по 150—200 тыс. томов. Очень крупными были и частные библиотеки. В X в. начинают появляться публич-

ные библиотеки: ученый и поэт Ибн-Хамдан учредил в Мосуле Дом мудрости с библиотекой, которой мог пользоваться всякий, стремившийся к знанию. В 994 г. везир Ардашир ибн-Сабур основал в Багдаде Дом мудрости с библиотекой в 10 400 томов. В Египте в 983 г. при мечети ал-Азхар был основан университет, существующий и поныне. В X в. в Нишапуре было открыто первое медресе — училище нового типа. Кроме общественных школ, пользовались услугами и домашних учителей, впрочем, несмотря на большое уважение к учености и ученым, труд учителей оплачивался неважно.

Источниками культуры и науки народов стран ислама послужили как труды античных и византийских ученых, так и опыт, накопленный народами, входившими в халифат. Обычно считается, что первым этапом развития арабоязычной науки явилась серия переводов научных сочинений с греческих оригиналов. Это не совсем так: не наличие переводов вызвало развитие науки, а потребности развивавшейся науки стимулировали появление переводов нужных сочинений. В частности, потребности практической механики заставили обратиться к сочинениям древних: Аристотеля, Герона Александрийского, Филона Византийского. Серьезное влияние на механиков оказали труды Иоанна Филопона; его учение развил, в частности, знаменитый Авиценна — Ибн-Сина (980—1037). Ибн-Сина считал, что сила, приданная движущемуся телу, не уничтожается и что если бы не было помех движению, то оно продолжалось бы бесконечно долго. Неоднократно комментировались учеными стран ислама труды Аристотеля. Известны комментарий Ибн-Сины и Мухаммеда ал-Бируни (973—1048), великого хорезмийского ученого-энциклопедиста. Следует особо отметить вклад хорезмийцев в точное естествознание; даже слово «алгоритм» является лишь латинизированным вариантом имени математика, труды которого лежат в основе арифметики и алгебры, — Мухаммеда ибн-Мусы ал-Хорезми (780—847).

Как уже упоминалось, практическая механика этого периода представлена главным образом переводами трудов Герона, Филона и других эллинистических ученых и их комментированием. Впрочем, комментарии зачастую выливались в самостоятельные сочинения. Так, в «Книге знаний» Ибн-Сина рассматривает пять простых машин, их комбинации и применение для подъема и передви-

жения грузов. Абу Абдаллаха ал-Хорезми (IX в.) во второй книге сочинения «Ключи наук» одну из глав посвятил механике. Работа эта является изложением «Механики» и «Пневматики» Герона. Более самостоятельны трактаты «Книга о познании практической механики» Исмаила ал-Джазари (XII—XIII вв.) и «О водяных колесах и подъеме воды и о служащих для этого механических устройствах» Мухаммеда ал-Хорасани.

Переводились также и труды Архимеда. Известен перевод, выполненный Сабитом ибн-Коррой (836—904). Он написал также «Книгу о корастуне», в которой излагается теория римских весов.

Большинство стран, входивших в состав халифата, — Южная Аравия, Египет, Месопотамия, Персия, Мавераннахр, Афганистан, Хорезм — существовали в условиях орошаемого земледелия, и ирригация была для них важнейшим делом; поэтому ученые арабоязычных стран проявляли к ее проблемам большой интерес. Водопользование было делом государственной важности, и государство содержало многочисленных чиновников-инженеров, которые должны были наблюдать за водой и за исправностью плотин, дамб и шлюзов. «Районы Восточной Персии, расположенные в стороне от основных рек, снабжали водой совершенно гениальные оросительные сооружения. Там речь шла о том, чтобы при наличии незначительных ручьев и ручейков собрать до последней капли воду, образуемую осадками и просачивающуюся из трещин горных склонов, а также грунтовые воды. Этой цели служила так называемая система каризов. В земле рыли длинные... штольни со слабым уклоном, причем на определенном расстоянии на поверхность выходили вентиляционные колодцы»¹. Было придумано много машин для ирригации: черпальные — зурнук и далийя, приводимое в движение водой черпальное колесо — наура, а также более сложные машины. Некоторые плотины достигали больших размеров. Так, на р. Кур в Персии в X в. была построена мощная плотина, основание которой залито свинцом. По обоим берегам реки были установлены 10 водяных мельниц и 10 черпальных колес; при помощи трубопровода эта установка давала воду для орошения полей 300 деревень.

¹ Меч А. Мусульманский ренессанс. М., «Наука», 1966, с. 351.

Водяные мельницы достигли в странах халифата такого распространения, что о ручном помоле зерна забыли. На многих реках строились плавучие мельницы, чтобы 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, которые приводились в движение отступавшей во время отлива водой. Много мельниц было поставлено на берегах Тигра, вблизи Багдада и Мосула. Мосульские мельницы строились из дерева и железа и подвешивались на железных цепях посреди реки; каждая мельница имела по два постава. В Багдаде мельницы были крупнее, самая большая из них имела 100 поставов.

В VIII в. в Персии и Ираке появляются ветряные мельницы различной конструкции. Имеются сведения о мельницах с ветряным колесом, лежавшим в горизонтальной плоскости; вертикальный вал вращал подвижной жернов. В этом случае отсутствовала передача и конструкция оказывалась достаточно простой. Ал-Гузули (?—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. Иногда он прекращается... и тогда в этой местности стоят все мельницы и все водочерпальные колеса... На мельницах у них устроены люки, которые открываются и закрываются, чтобы ветра падало то больше, то меньше. Поэтому что, когда он дует слишком сильно, мука горит и выходит черной, порой даже жернов раскаляется и разваливается на куски»².

В IX столетии в Самарканде было изобретено производство бумаги из тряпья, и на длительное время этот город стал центром бумажных фабрик. В одном из писем ал-Хорезми извиняет своего друга, который давно не писал ему, тем, что тот живет далеко от Самарканды и поэтому бумага слишком дорога для него.

Что касается строительства общественных зданий, то здесь несомненно заимствования из византийской техники. Повсеместно на Востоке строятся купольные мече-

² Меч А. Мусульманский ренессанс, с. 363.

ти; купольные перекрытия принимают различные формы. Появляется так называемый арабский свод — стрельчатая арка, хорошо работающая на сжатие. Кривая арки вычерчивалась сперва из двух (как в мавзолее Исмайла Саманида в Бухаре), затем из четырех центров. Наиболее частой формой куполов становится на исламском Востоке сфероконическая. При этом переходы от квадрата основания к куполу делаются при помощи консольных парусов, или тромпов. Прямоугольные помещения перекрываются сводами.

При мечетях строились минареты, с которых объявлялось время молитвы. Так как в большинстве случаев они представляли собой башни с небольшим сечением, то вырабатывается их форма: поперечное сечение слегка уменьшается кверху. Обоснованность такого решения очевидна: сохраняется устойчивость даже в сейсмически опасных местностях. Так, бухарский минарет Калян имеет высоту до 46 м и приближается по форме к телу равного сопротивления на сжатие.

Как видим, прикладная механика в арабоязычных странах пополнилась новыми знаниями, так сказать, получила значительное приращение. Особенно увеличились познания в строительной механике и гидравлике; значительного развития достигла также техника построения мельниц и военных машин.

Мировое значение науки арабоязычных стран состоит в том, что она сохранила и творчески развила науку, унаследованную от Греции и эллинистических стран, а также ввела в научный оборот результаты творчества индийских ученых. Наследие это в области математики и механики различными путями было передано в Западную Европу. Одним из основных путей стала Испания.

Завоевание Испании было предпринято арабами в начале VIII в. Однако в Бискайе и Астурии остались центры сопротивления, которые продолжили и развернули борьбу с завоевателями. Впрочем, арабы очень быстро смешались с местным населением, и борьба эта приняла форму религиозной — между испанцами-христианами и испанцами-мусульманами.

Арабский халифат оказался недолговечным: уже в VIII в. от него отпали отдельные страны, в которых власть халифа стала признаваться лишь формально. Мусульманская Испания также отделилась от халифата,

а вскоре и сама распалась на много самостоятельных феодальных княжеств-эмиратов.

В 912 г. эмир Кордовы Абдеррахман III восстановил единство мусульманской части Испании. К этому времени относится золотой век науки в арабоязычной Испании: был переведен и прокомментирован ряд творений греческих и эллинистических ученых, началось и собственное математическое творчество. В 30-х годах X в. в Кордовской академии преподавал Мослема эль Махриси, уроженец Мадрида, крупнейший испанский математик. Он, в частности, познакомил испанцев с творчеством ал-Хорезми.

В X в. начались мирные контакты между обеими частями Испании. Испанцы-северяне стали посещать учебные заведения Южной Испании, возникают целые школы переводчиков с арабского языка на латинский. Одним из первых познакомил Западную Европу с арабской математикой бенедиктинский монах Герберт Орилакский (ок. 938—1003), впоследствии папа Сильвестр II. Ему приписывается также изобретение механических часов. Но, возможно, это изобретение было сделано раньше, в халифате, поскольку арабоязычные ученые серьезно занимались изучением эллинистических и византийских трудов по автоматам. Есть сведения, что Карл Великий (786—814) в свое время получил часы в подарок от халифа Гаруна ар-Рашида.

— Развитие механики в Западной Европе в течение 1000 лет происходит двумя различными путями, которые почти не пересекаются. Механические знания развивают практики, которым приходится сооружать здания и мосты, строить мельницы и военные орудия. Так развивается практическая механика, которая только в конце рассматриваемого периода получает литературное оформление. Механикой как наукой занимаются ученые, которые преподают в школах: это путь теоретической механики. Подобно тому как в Греции между философами-теоретиками и механиками-практиками не существовало взаимного доверия, так и здесь между учеными-схоластами и практиками — инженерами и архитекторами не заметно огласия. Каждый работает для себя и редко одни списываются с опытом или знаниями других.

Средневековая школа пришла на смену римской с кругом знаний, заимствованным от этой последней. Первой попыткой ввести некоторый порядок в круг знаний

была связанная с потребностями школы систематика поздне-римского философа и математика Аниция Северина Боеция (ок. 470—525), который разделил науки на гуманитарные и математические, так называемые тривиум и квадривиум. В тривиум входили грамматика, риторика и диалектика, в квадривиум — арифметика, музыка, геометрия и астрономия³.

Эта «классификация» наук в VIII в. была признана «главным идеологом» образования времен Карла Великого англичанином Алквином (755—804). В той или иной мере ей следовали европейские школы до XVII в. включительно, чем с одной стороны доказали ее жизнеспособность, а с другой — инерцию, свойственную школьному образованию. Хотя в школах механикой иногда занимались, в список наук она не попала, так как до XVIII в. в системе школьных знаний механика относилась к математике.

По настоянию Алквина в капитулярий Карла Великого было внесено требование, чтобы каждый монастырь и каждый городской собор имели свои школы. Кроме того, по потребности школы открывались и при приходских церквях.

Таким образом, в раннем средневековье различались школы монастырские, кафедральные и городские. Монастырские школы обычно имели два отделения: внутреннее, для обучения монахов, и внешнее, в котором обучались светские люди. С течением времени «внешние» школы выделились из-под власти монастырского начальства и включили в число изучаемых предметов, ряд наук, которым ранее в монастырских школах не обучали, в частности право и медицину. Так выделились «внешние» школы в Болонье, Париже и Кембридже в XII в.; они получили название университетов. Почти одновременно с ними возник университет в Оксфорде.

В составе университетов обычно было четыре факуль-

³ В школах того времени бывало двуступное, в котором пояснялись эти науки:

Cram loquitur, Dia verba docet, Rhet verba coloret; Mus canit, Ar numerat, Geo ponderat, Ast colit astra,

что значит: Грамматика говорит, Диалектика учит словам, Риторика украшает речь; Музыка поет, Арифметика считает, Геометрия взвешивает и измеряет, Астрономия считает звезды.

тета, три старших — медицинский, юридический и теологический и младший — факультет искусств, на котором изучались науки тривиума и квадривиума и который играл роль подготовительного факультета для старших факультетов. Он давал звание бакалавра, которое можно сравнить с современным аттестатом зрелости. Именно этот факультет и был той «внешней» школой, которая выделилась когда-то из монастырской школы и получила самостоятельное существование. В новых университетах, возникших позже, факультет искусств образуется по традиции. Впрочем, в нем была и настоятельная потребность: чтобы изучать медицину, право или богословие, студенты должны были хорошо владеть латинским языком — языком школы и науки.

Одним из первых механиков-теоретиков средневековой Европы был Иоанн Неморарий. Об этом ученом почти ничего неизвестно; полагают, что он жил в XI, XII, а возможно, и в XIII в. (последнее — вернее). Им написаны или ему приписываются три трактата о тяжестих, в которых рассматриваются законы равновесия рычага. По его мнению, тяжесть соответствует положению: один и тот же груз оказывает разное действие на плечи рычага в зависимости от точки его приложения. Движение любой тяжести направлено вниз. Под именем Неморария известен еще один трактат «Об отношении тяжестих», написанный также в XIII в., но принадлежащий или непосредственному ученику Неморария, или ученому, относящемуся к той же школе. Автор трактата обобщает учение о рычаге, он пользуется понятием момента, решает задачу о равновесии твердого тела на наклонной плоскости при условии различных углов наклона.

Как видим, все это касается статики, ее достаточно хорошо знали ученые эпохи эллинизма. Но ученые средневековья уже не удовлетворяются изучением равновесия тел: их интересует также, а может быть, еще в большей степени движение тел. При этом они различают геометрию движения, кинематику, и движение под действием сил, динамику. В динамике начинают развиваться идеи византийского механика Иоанна Филопона, а также высказываются собственные мысли. Так, Неморарий утверждает, что сопротивление среды движущемуся телу зависит от формы тела. Тело лучше проникает сквозь сопротивляющуюся среду, если оно заострено и обладает глад-

кой поверхностью. Всякая среда сжимаема, поэтому нижние слои плотнее верхних, а следовательно, и движение более затруднено в нижних слоях, нежели в верхних. Однако выводы из этих положений обличают отсутствие эксперимента: падение в нижних слоях среды более медленное, чем в верхних.

Значительное внимание схоласты-теоретики средневековой Европы оказывали также общим проблемам движения тел. Одним из первых занялся задачами геометрии движения Герард Брюссельский (вторая половина XII — первая половина XIII в.) в трактате, озаглавленном «О движении». Герард имеет понятие о равномерном движении, хотя понятие скорости у него совпадает с понятием движения. Знает он и неравномерное движение, примером которого является вращение тела вокруг некоторой точки. Движение (скорость) в центре вращения равна нулю, и на ободу оно достигает максимальной величины.

Трактат Герарда изучался и комментировался учеными так называемой оксфордской школы. В трактате «О пропорциях скоростей в движении» оксфордский ученый Томас Брадвардин (первая половина XIV в.) формулирует закон скоростей: «Отношение скоростей при движениях меняется соответственно отношению движущих сил к силам сопротивления». В другом трактате, «О континууме», Брадвардин приходит к выводу, что время делимо до бесконечности. Он различает «качество движения» — скорость и «количество движения» — его продолжительность. Ученые оксфордской школы дали определение равномерно ускоренного движения, ввели понятия мгновенной скорости, ускорения и замедления. Два последних понятия считались самостоятельными, так как европейские математики еще не знали отрицательных величин.

В Оксфордском университете учился в начале XIII в. один из величайших мыслителей и ученых средневековья Роджер Бэкон (1214—1294). Из Оксфорда он перебрался в Париж, где учился и преподавал, затем возвратился в Оксфорд и вступил там в монашеский орден францисканцев. За свои воззрения он неоднократно подвергался репрессиям, сидел в тюрьме в Оксфорде и Париже, с 1257 по 1267 г. находился под надзором ордена, а в 1278 г. был посажен в тюрьму на 14 лет. Он отстаивал право науки на самостоятельное развитие, одним из первых

указал на необходимость изучения природы и на то, что нельзя слепо следовать Аристотелю.

Бэкон исследовал понятие силы. Всякий естественный процесс, по его мнению, происходит в результате действия какой-либо силы. Таким образом, действие силы определяет любое изменение. Бэкон различал науки опытные, умозрительные и прикладные искусства. По его мнению, опытные науки имеют преимущество перед остальными, ибо они проверяют свои заключения прямым опытом, открывают истины, непостижимые иным путем, и знакомят нас с прошлым и будущим. В «Письме о секретных творениях» Бэкон писал, что можно построить такие корабли, которыми будет управлять один человек, но двигаться они будут быстрее, чем на всех парусах, что можно построить машины для подъема больших тяжестей, машины для движения по дорогам без помощи животных, машины для летания по воздуху и т. п. Ему самому приписываются некоторые механические изобретения.

XIII и XIV века характеризуются быстрым развитием феодальных отношений. Вся Европа оказывается разделенной на большое количество крупных, мелких и мельчайших «государств», которые находятся в состоянии непрерывной войны друг с другом. Растут феодальные замки, для овладения которыми требуется все более мощная военная техника. Появляются мощные метательные машины, обычно стационарные, в которых в качестве упругого элемента использовался гибкий ствол дерева (бриколь — для метания стрел, фрондибола — для метания камней). Инженеры начинают придумывать различные прицельные устройства, появляется и легкая подвижная «артиллерия» — аркбаллисты разных конструкций, смонтированные на колесной раме. В XIV в. был изобретен порох и началась эра огнестрельной артиллерии.

Не удивительно, что уже в XIII в. ученые начинают интересоваться вопросами динамики. Развивается идея Иоанна Филопона о том, что сила, бросившая тело, передается этому телу. Так, Вильгельм д'Оккам (1280—1347) предполагал, что движитель не может быть связан с органом, бросившим движущееся тело: ведь орган может быть разрушен сразу же после броска, а движение тем не менее продолжится. Движитель не может быть связан и с воздухом, так как если два стрелка одновременно выстрелят друг в друга, то оба могут одновременно получить

раны, что означало бы, что один и тот же поток воздуха действует в двух различных направлениях. Однако он не смог из этих положений вывести заключение.

Решение этой задачи в виде учения об импетусе предложил французский ученый Жан Буридан (умер в 1358 г.), бывший одно время ректором Парижского университета. Учение его заключается в следующем: движущееся тело получает от движителя импетус — определенную силу, которая может двигать его в том направлении, в каком его двинет движитель. Чем большей будет скорость, с которой брошено тело, тем сильнее будет приданный ему импетус. Именно импетус движет камень после того, как движение толчка прекратилось, но вследствие сопротивления воздуха и благодаря тяжести, которая побуждает камень двигаться в сторону, противоположную импетусу, последний непрерывно ослабляется, иначе движение не прекратилось бы никогда. В конце концов импетус преодолевается, и тяжесть, воздействуя на камень, приводит его к «естественному местоположению». По Буридану, импетус пропорционален плотности и объему тела, к которому он приложен.

В середине XIV в. учились, а затем преподавали в Парижском университете двое ученых, оставивших важный след в истории механики. Это были Альберт Саксонский и Николай Орем.

Альберт де Хельмштедт (Альберт Саксонский) жил во второй и третьей четвертях века. В университете он преподавал в 1350 — 1361 гг., а в 1353 г. был его ректором. Рассуждения Альберта Саксонского типичны для схоластов: они умозрительны и далеки от опытной проверки. Он много и умно рассуждает о центре тяжести, критикует в этом отношении Аристотеля, доказывает, что каждое тело имеет точку, в которой как бы сосредоточен весь его вес, и одновременно с этим доказывает, что Земля находится в центре Вселенной: если бы этого не было, то влечение ее центра тяжести понудило бы ее занять центральное положение. Он был сторонником теории импетуса и утверждал, что при падении тел сопротивление растёт скорее, чем получаемый импетус, в результате чего скорость стремится к некоторой максимальной величине; расти беспрестанно, как утверждали другие, она не может. По-видимому, в этом отношении идеи Альберта Саксонского повлияли на становление теории Галилея.

Ученик Буридана — Николай Орем (1323—1382) с 1362 г. руководил одним из парижских коллежей, а затем был епископом в Лизье. Ему принадлежит идея ортогональных координат: он утверждал, что графически можно изображать любые измеримые количества. В динамике он придерживался теории импетуса, а в кинематике пользовался графическим изображением. Орем исследовал понятия равномерного и неравномерного движения и был близок к правильной формулировке равномерно-ускоренного движения. В своем трактате о небе и мире он придерживался той мысли, что Земля движется относительно неба, и таким образом предвосхитил идею Коперника. Впрочем, трактат Орема никогда не был напечатан, и его мало кто знал.

Итак, ученые-схоласты путем рассуждения, а иногда и наблюдения приблизились к пониманию механических явлений. Даже в творчестве Фомы Аквинского (1225—1274), которое стало официальной идеологией католической церкви, есть интересные рассуждения. Аквинский основывает свое научное и философское учение на творчестве Аристотеля, но указывает при этом, что область веры не следует смешивать с областью знания: ссылки на бога в вопросах физики он считает невежеством. Он указывает на различие между математическими и физическими телами: первые делимы бесконечно, тогда как вторые имеют предел делимости, перейдя который перестают быть самими собою, разлагаясь на простейшие элементы, «ибо всем природным телам положена граница и определенная пропорция в смысле размера и увеличения; и поэтому можно дойти до наименьшей частицы воды и мяса». Он утверждал затем, что время непрерывно и связано с движением. Разбирает он и вопрос о бесконечности.

Тем временем в рамках феодального общества нарождались новые отношения между людьми. В конце средневековья в растущих городах власть постепенно переходит от господ по праву рождения к господам по праву богатства — к торговцам и старшинам ремесленных цехов. Города растут не только вширь, но и ввысь; строят стены и укрепления, чтобы тем самым защитить жизнь и имущество горожан от своих и чужих господ, от пиратов и бродячих солдат. Особенно трудно жить в прибрежных городах: тема рабства, боязни попасть на невольничий

рынок сквозит у героев романов и новелл Боккаччо, Сервантеса, даже Вольтера.

Развивается строительство церквей и монастырей, кроме средоточия веры, они были и центрами образования (пока не начали тормозить развитие науки), и оборонными сооружениями, а иногда отдавали свои подвалы под купеческие склады.

Все это повышает роль строителей и архитекторов. Цехи каменщиков, в которые они входили, оказываются хранителями производственных секретов: у строителей накапливаются большие практические познания из области строительной механики. Много делалось на ощупь и соборы, и оборонные сооружения строились в течение многих десятилетий, и зачастую трудно приписать их план какому-либо архитектору. Это в полном смысле слова коллективные сооружения. (Дело не обходилось и без многочисленных неприятностей: иногда кладка арок, сводчатых перекрытий и куполов не удавалась, происходило много обвалов и катастроф: так обрушился потолок зала в Эрфурте, где происходил съезд феодалов Германской империи.)

К XII в. относится начало развития готической архитектуры, родина которой — Франция: в 1163 г. был заложен фундамент парижского собора Нотр-Дам⁴.

Суть готической архитектуры заключалась в расширении внутреннего пространства и увеличении его высоты с помощью новых, более совершенных видов перекрытий. Готические зодчие применили системы стрельчатых сводов на ребрах с облегченной оболочкой самого свода, что значительно снизило его вес. Затем они облегчили внутренние опоры сводов; внутренние столбы несут главным образом вертикальную нагрузку, а большая часть распора сводов передается на контрфорсы. Так выработалось сознательное распределение сил по основным конструкциям здания: в XIV в. эти знания записывались в трактатах.

В период раннего средневековья появляется и профессия инженера. Сперва она не была цеховой и означала лишь совокупность знаний, которые могли быть у зод-

⁴ Однако есть мнение, что стиль, названный готическим, был изобретен великим армянским архитектором Трдатом (конец X — начало XI в.) и из Армении попал на Запад. Дело в том, что собор в Ани, построенный Трдатом в 989—1001 гг., уже имеет все признаки раннеготического здания.

чего, скульптора или художника, помимо его основных профессиональных умений. Сплошь и рядом один и тот же человек строил машины, сооружал укрепления, строил водопроводы, ваял, писал картины и исполнял еще много мелких поручений феодального властителя или бюргерской знати. Каждый такой инженер или архитектор обязательно должен был быть также механиком, ибо без знания механики его машины могли отказать в действии, а выстроенные им крепости — не выдержать удара осадной мощи противника.

Основные технологические машины средневековья — это мельницы: водяные, унаследованные от Римской империи, и ветряные, заимствованные с Востока. В X в. они попали в Испанию, а с XII столетия начинают распространяться по всей Европе, правда очень медленно. И если Дон-Кихот в начале XVI в. атаковал ветряную мельницу, приняв ее за злонамеренного великана, то это случилось, вероятно, потому, что в Ламанчи, откуда он был родом и где провел почти всю свою жизнь, ветряных мельниц не было.

Сперва мельницы применялись по своему прямому назначению для помола зерна. Однако уже в 1086 г. в Нормандии была мельница-сукновальня. В XII в. такие мельницы распространяются по всей Франции, затем попадают в Англию, а в 1212 г. сукновальня с водяным приводом сооружается и в Польше. Принцип действия таких мельниц заключался в следующем: главный вал, приводимый во вращении водяным колесом, нес жестко закрепленные кулачки, которые поочередно поднимали колотушки, валявшие сукно в чанах. В 1040 г. в Дофине появились мельницы для изготовления пеньки, а в XIII в. они распространяются по Европе. В 1104 г. в Каталонии уже работала железодельная мельница: кулачок, закрепленный на главном валу, опускал вниз меньшее плечо неравноплечего рычага; молот, закрепленный на конце большого плеча, падал затем на наковальню. Мельницы такого типа в течение XII—XIII вв. распространяются повсеместно, в XIV в. их начинают сооружать в Польше.

Бумага была изобретена на Востоке, однако там ее делали вручную. Бумагоделательные мельницы появляются в европейских странах в XII—XIII вв. Несколько позже начали устраивать пильные мельницы для распиловки досок, первые упоминания о них относятся к 1337 г.

Ветряные мельницы быстро распространились по всей Европе, и уже в XIII в. появились два их основных типа: немецкие с поворотным корпусом и голландские, у которых вал крыла поворачивался вместе с крышей. Голландский тип распространился по северо-западной Европе, в Польше и на Украине строили ветряные мельницы немецкого типа.

Мельницы были машинами, заменявшими физическую силу человека, поэтому их начали применять на различных несложных технологических операциях, требовавших от исполнителя большой силы. То же относится и к другим машинам средневековья: военным, строительным, горнозаводским и водоподающим. Везде машины лишь подменяют физическую силу человека, тем самым увеличивая его возможности. Военные метательные машины к середине XIV в. начинают сдавать свои позиции пороховой артиллерии. Первые пушки делались из продольных полос кованого железа, грубо сваренных и скрепленных рядом железных же обручей. Порох закладывался «по соображению», затем орудие стреляло или разрывалось, и неизвестно, кто терпел больший урон — осаждающие или осаждаемые.

Славяне впервые появляются на арене мировой истории в VI в.: они начинают с севера теснить византийцев. В 597 г. при осаде Фессалоник славяне применяли метательные орудия, тараны и другие военные машины. Очевидно, они уже не были такими варварами, как и описывают византийские историки; во всяком случае и военная техника сравнима с византийской. В 623 и 626 гг. славяне осаждали саму Византию с суши и моря. Они применяли метательные и осадные машины. В 907 г. к Византии двинулся киевский князь Олег. Так как византийцы перегородили проливы цепями, он высадился на берегу моря и подошел к стенам с суши. Легенда приписывает ему использование силы ветра: он поставил свои суда на колеса и под парусами подошел к столице. Святослав Киевский во время балканских походов также применял военные машины.

В X в. в Киевской Руси началось каменное строительство. Зодчие разработали своеобразные формы перекрытий и куполов. Некоторые из храмов, построенных в XI—XII вв., просуществовали около 900 лет, а Софийский собор в Киеве стоит и до сих пор, что свидетель-

ствует не только о большом мастерстве киевских зодчих и каменщиков, но и о значительных познаниях в области практической механики, которыми они владели. Запас прочности соблюдался ими в определенных пределах; так, киевская Десятинная церковь не выдержала нагрузки от людей, переполнивших хоры в день взятия Киева Батыем в 1240 г., и хоры обрушились.

Войска Чингисхана, прежде чем попасть в южнорусские степи, овладели Средней Азией и Ираном и захватили оттуда с собой ремесленников и инженеров, хорошо знавших военную технику. Плано Карпини, проехавший в те годы через Среднюю Азию и Киевскую Русь (в Киеве он был в июне 1246 г.), пишет, что при осаде татары пользовались машинами, которыми разбивали стены крепостей, бросали стрелы и «греческий огонь». Они отводили реки от городов, делали подкопы, огораживали свои станы. Постепенно совершенствовалась и русская военная техника: пороки и иные военные машины неоднократно упоминаются в летописях. Огнестрельная техника попала на Русь в середине XIV в., по-видимому, двумя путями: с Запада — арматы, с Востока — тюфяки («тюфяк» — португальский пушк, ружье).

В 1404 г. в Москве были установлены городские часы, построил их афонский монах серб Лазарь. На циферблате славянскими цифрами были обозначены часы от 1 до 12. Как писал летописец: «Сей часник называется часомерье. Каждый час он ударяет молотом в колокол, измеряя и рассчитывая ночные и дневные часы. Не человек ударяет, но человековидно, самозвонно и самодвижно. Удивительно, как то сделано человеческим мастерством, изобретено и придумано».

В XIII в. на реках и речках Руси появляются первые водяные мельницы. Сперва они применялись исключительно для помола зерна, но, по-видимому, уже в XV в. начинается и технологическое применение гидросиловых установок. Известны сложные системы машин, работающих с помощью гидропривода, которые построил в середине XVI в. в Соловецком монастыре игумен Филипп Колычев (1507—1569), один из самых замечательных инженеров Московской Руси.

В том же XVI в. в районе Вычегды действовала железнодорожная мельница, в 60-х годах XVI в. под Москвой заработала первая в стране бумажная мельница.

Примерно тогда же появляются технологические мельницы и на Украине. Так, во Львове в XVI в. работали дубильные, маслобойные и иные мельницы. Была построена и бумажная мельница.

В XV в. было изобретено книгопечатание. Первый печатник Иоганн Гутенберг (ок. 1399—1468) между 1436 и 1444 г. построил словолитню и печатный пресс и в 1455 г. закончил печатание так называемой 42-строчной Библии. Уже в конце XV в. в Кракове выходят книги на церковнославянском языке, в 1517 г. первую книгу напечатал белорусский первопечатник Франциск Скорина (ок. 1490 — ок. 1551). Интересны иллюстрации к его Библии: на титульном листе к Книге царств изображено строительство готического собора, видны подъемная машина с лебедкой, распоры и контрфорсы самого здания. В 1563 г. в Москве дьякон Иван Федоров (? — 1583) с Петром Мстиславцем начали печатать первую русскую книгу «Апостол». Сразу же по выходе «Апостола» на них начались гонения и они вынуждены были бежать. Иван Федоров продолжил свое дело в Белоруссии, в Заблудове, а затем переселился во Львов. Мстиславец организовал печатное дело в Вильне. Как известно, первым печатным станком был винтовой пресс, и местное происхождение прессов во всех этих случаях несомненно.

Каменное строительство в пределах Московской Руси в XV—XVI вв. достигает небывалого расцвета: зодчие создают своеобразный стиль, строят они добротно и прочно. В 1474 г. в Москву для сооружения Успенского собора в Кремле был приглашен из Италии (на жалованье 10 руб. в месяц) выдающийся инженер, архитектор, механик, литейщик и монетчик Родольфо Фиоравенти дель Альберти (1415—1485?), прозванный «хитрости ради» Аристотелем. Фиоравенти построил собор по образцу владимирского Успенского собора, т. е. при постройке главную роль сыграли его инженерно-механические познания.

Кроме Успенского собора в Москве, Фиоравенти построил еще ряд храмов и обучал мастеров искусству зодчества.

В эти же годы на Севере Руси, в Пскове, сложилась самостоятельная архитектурная школа. На основании опыта владимирских зодчих с использованием итальянской техники и северной русской архитектуры возникает к концу века самостоятельная московская школа. В XVI в.

создаются самобытные сооружения и наиболее яркое из них — собор Василия Блаженного в Москве.

В XVI в. культурно-технический взлет Московской Руси настолько мощен, что невольно напрашивается параллель с итальянским Ренессансом.

Ремесленное производство в странах Западной Европы почти повсеместно еще с XIV в. приобретает структуру цеховых сообществ. Цехи монополизировали право занятия ремеслом, и мало-помалу доступ в состав цехов затрудняется. Чтобы стать полноправным членом цеха, мастером, работник должен добрый десяток лет пробывать учеником и подмастерьем. Ремесленники же, не члены цехов, работавшие «а parte» (итальянское — «на стороне»), «партачи», нещадно эксплуатировались цеховой верхушкой. Последняя вместе с крупнейшим купечеством составляет патрициат, который зачастую берет власть в городе в свои руки. Художники всех видов искусств, включая механиков и инженеров, также входят в состав цехов, но младших, которые не имеют власти. Знаний у них все время прибывало, и работали они и по заказу монархов, и по заказам знатных патрициев много и хорошо. Впрочем, платили за работу и те и другие мало и плохо и по мере своих возможностей старались вообще не платить.

Опыт, который накапливался у ремесленников и художников, те практические знания, которые они получали в процессе своего цехового ученичества и как производственные секреты, не могли не повлиять на развитие науки.

Среди университетских профессоров, схоластов, раздаются голоса о необходимости и в науке пользоваться опытом, а не только рассуждением. К опыту призывал Николай Кузанский (1401—1464), философ и богослов по форме своих работ, а по их содержанию — математик и естествоиспытатель. В сочинении о вращении Земли он опередил Коперника. Если не считать Архимеда с его дискретной бесконечностью, то Николай Кузанский был основоположником математического учения о бесконечности. В учении о движении он был сторонником теории импетуса. Он считал, что шарообразная форма является самой совершенной и если движение для идеально круглой сферы оказывается естественным, то оно никогда не прекратится. Он доказывал, что движение

идеального шара по идеально плоскому полу не может прекратиться, ибо шар не может изменить своего состояния.

Со второй половины XV в. начинается эпоха Ренессанса. «Это был величайший прогрессивный переворот из всех пережитых до того времени человечеством,— писал 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 совершил 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, содержащую в себе некоторые идеи, которые много позднее были вновь подхвачены... Герои того времени не стали еще рабами разделения труда, ограничивающее, создающее односторонность 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 ранга, или благоразумные филистеры, нежелающие обжечь себе пальцы»⁵.

В 1453 г. турки штурмом взяли Константинополь, столицу Византии. Восточная империя исчезла с лица земли, ученые, бежавшие на Запад, захватили с собой много бесценных рукописей греческих и эллинистических ученых, принесли и свои знания. Мир науки и культуры внезапно расширился. Затем последовало открытие Колумба, удвоившее мир; оказалось, что обитатели потусторонних земель ходят не вниз головой, как это было бы «естественно», а вниз ногами, подобно европейцам. Рас-

ширение мира стимулировало бурный рост торговли и цеховой деятельности; консолидация монархий, покончившая с феодальной вольницей, также оказалась благоприятной для дальнейшего развития науки и техники. И людям Ренессанса, как на это указал Энгельс, приходилось быть специалистами на все руки в полном смысле этого слова.

Сохранился любопытный документ начала 1481 г.: тридцатилетний Леонардо да Винчи (1452—1519) предлагает свои услуги правителю Милана Лодовико Сфорца:

«Поскольку, сиятельнейший господин, я видал и продумал опыт всех тех, кои выдают себя за знатоков в искусстве изобретения военных машин, и нашел, что их инструменты не отличаются ни в чем существенном от тех, которые общеизвестны, я решаюсь... сообщить Вашей светлости о некоторых секретах, которыми обладаю я, в следующем кратком перечислении:

1. Я владею способом постройки очень легких мостов, которые можно легко переносить и с помощью которых можно привести врага в бегство и преследовать его. Знаю также и иные, более прочные, которые смогут противостоять огню и мечу и которые можно легко поднимать и опускать. Я знаю также способы сжигать и разрушать вражеские мосты.

2. В случае осады я знаю как осушать рвы, строить складные лестницы и иные подобные машины.

3. Далее: в случае высокого местоположения или мощности враждебной позиции, когда невозможно ее обстрелять, я знаю способы уничтожить ее путем минирования, если только фундамент крепости не скалистый.

4. Я умею также строить нетяжелые пушки, легкие в перевозке, которые могут бросать горючие материалы, дым коих вызовет ужас, разрушения и растерянность среди врага.

5. Далее: при помощи узких и извилистых подземных ходов, сооружаемых без всякого шума, я могу создать проход в самые недоступные места, причем даже под реками.

6. Далее: я умею строить безопасные крытые повозки для подвоза пушек к расположению врага, сопротивляться коим не смогут даже значительные силы и под защитой которых пехота сможет безопасно подойти к месту боя.

⁵ Маркс К., Энгельс Ф. Соч., т. 20, с. 346—347.

7. Я могу строить орудия, мортиры и огнемётные машины и иные, одновременно прекрасной и полезной формы, которые отличаются от всех, применяемых в настоящее время.

8. Или же, если применение пушек окажется невозможным, я смогу заменить их катапультами или иными прекрасными бросающими машинами, доселе неизвестными. Коротко говоря, я смогу создать бесконечное число орудий для нападения.

9. А если сражение должно разыграться на море, я знаю многие, чрезвычайно мощные машины как для нападения, так и для защиты и такие корабли, которые будут безопасны как от пушечной стрельбы, так и от огня. Знаю я также порохи и воспламеняющиеся вещества.

10. Полагаю, что в мирное время я смогу соревноваться с каждым по части архитектуры, а также по части сооружения общественных и частных монументов и в постройке каналов.

Я могу выполнять статуи из мрамора, бронзы и из глины; что касается живописи, то в ней я могу соперничать с любым. В частности, я смогу изваять из бронзы конную статую вашего вечной памяти отца... Если из вышеупомянутых вещей покажется что-либо вам невыполнимым, то я готов выполнить сие...»⁶

Леонардо не преувеличивал: он действительно и мог все и занимался всем. В этом была сильная сторона его гения, но здесь же была и его слабость: он не мог сосредоточиться, многое начал, но немного закончил. После него осталось множество записок, заметок, схем и рисунков, которые он предполагал слить в трактаты; этого он тоже не сделал. Многие из них относятся и к механике. Леонардо — практик, и его теоретические рассуждения играют лишь подсобную роль. В механике он занимался изучением движения тел по наклонной плоскости, законом рычага, уяснил понятие момента, исследовал трение, падение тяжелых тел, законы гидростатики. В динамике он следовал учению Бурдана. Он пробовал определить понятие силы, впрочем без особого успеха. Он пытался также складывать и разлагать силы.

⁶ Цит. по кн.: *Hart Ivor B. The world of Leonardo da Vinci, man of science, engineer and dreamer of flight. London, 1961, p. 22.*

Леонардо первым исследовал полет птиц и приблизился к созданию аппарата тяжелее воздуха. Он создал много различных схем машин и предвосхитил идею о составе машины из механизмов (а не из «простых машин»). Он изучил трение и понял невозможность вечного двигателя лет за 300 до того, как это было доказано.

В годы деятельности Леонардо понятие «инженер» уже бытовало в Западной Европе. Появилось оно около XII в. и обозначало строителя военных машин и фортификаций (т. е. специалиста, которого в эпоху эллинизма называли «механиком»), так как все технические средства по части ведения военных операций и обороны назывались «*ingenia*». С XV в. в Италии инженерами называют также строителей каналов.

Леонардо неоднократно указывал на значение математики для инженерного дела. В этом он следовал за знаменитым архитектором Филиппо Брунеллески (1377—1446).

Брунеллески сознательно пользовался расчетными методами и говорил о важности математики для всех искусств. Математические познания Брунеллески и изучение римских построек дали ему возможность установить пропорции здания, эстетические и одновременно оптимальные с точки зрения техники. Таким образом, в строительстве вводятся методы расчета, что явилось одним из первых шагов перехода строительной механики от практической науки к прикладной. Шедевром Брунеллески стал купол флорентийского собора Санта Мария дель Фьоре диаметром 42 м — на 10 м больше купола Софийского собора в Константинополе. Купол не имел правильной сферической формы, его внутренняя поверхность была описана радиусом, равным трем четвертям диаметра основания; он крепился восемью ребрами, воспринимавшими вес фонаря и опиравшимися на углы барабана. Брунеллески строил купол с 1419 по 1434 г. Для выполнения строительных работ он сконструировал и построил несколько кранов и иных подъемных машин.

Крупнейший художник немецкого Возрождения Альбрехт Дюрер (1471—1528) также широко пользовался математикой как прикладной наукой. В «Наставлении к укреплению городов» (1525) он разработал теорию фортификации. Он применил геометрические методы к изображению человеческого тела, при построениях пользовался

циркулем и линейкой и основами проекционного черчения. Он разрабатывал теорию пропорций, учение о перспективе и учение о проекциях, которым он пользовался не только в живописи, но и в своих инженерных работах.

Тем временем в Польше, в старинном поморском городе Торунь, сын краковского купца каноник Николай Коперник (1473—1543), астроном и математик, работал над гелиоцентрической моделью мира. Труд Коперника «Об обращениях небесных сфер» вышел из печати в год его смерти. Введя в теорию строения мира принцип относительности движения, Коперник не только значительно упростил очень сложную кинематику движения планет, разработанную в геоцентрической системе Птолемея, но и доказал, что Земля является одной из планет, вращающихся вокруг Солнца, и что, кроме того, она вращается и вокруг собственной оси. Революционное учение Коперника послужило основанием для развития науки о Вселенной. Впервые была поставлена задача о движении небесных тел, не кажущемся, а естественном, чем подтверждена была догадка древних астрономов и заложены основы новой науки — небесной механики.

В эпоху позднего Ренессанса, в XVI в., все больше работ посвящается проблемам прикладной механики. В 1537 и 1546 гг. вышли в свет две работы Никколо Тарталья (1499—1557), в которых были заложены основы теории полета снаряда, брошенного под углом к горизонту. Тарталья пользовался теорией импетуса, сопротивления воздуха он не учитывал. Его ученик Джованни Баттиста Бенедетти (1530—1590) развил учение о моменте силы относительно некоторой точки, в 1586 г. он высказал мнение, что тело, вращающееся вокруг точки, в случае нарушения связи с этой точкой полетит по касательной к окружности, а не по радиусу, как думали до того времени. Бенедетти был последователем Коперника и в своих сочинениях приводил некоторые доказательства его гипотезы. Он развил также теорию равновесия жидкости в сообщающихся сосудах.

Ряд результатов в области прикладной механики получил выдающийся итальянский ученый-энциклопедист Джироламо Кардано (1501—1576). В особенности он прославился как математик и медик, но с воодушевлением занимался и астрологией. В механике он разрабатывал тео-

рию сопротивления среды движению тел. Известно его доказательство невозможности вечного движения: подобно Леонардо, он учитывал вредные сопротивления. Кардано довольно основательно разработал теорию передач, особенно определение передаточных отношений путем подсчета чисел зубьев зубчатых колес. Ему принадлежат некоторые изобретения в часовом искусстве и в практической гидравлике. Занимался он и мельничным делом: в частности, опубликовал одно из первых описаний ветряной мельницы.

Как видим, в эпоху Ренессанса основная работа по созданию науки о движении выпала на долю инженеров и практиков, и занимались они главным образом прикладными вопросами. Это было совершенно естественно. Официальная наука, которую преподавали в университетах и которая в существеннейшей части основана на рассуждениях, себя исчерпала и начала тормозить развитие прогресса. Разделение науки на схоластическую, науку рассуждения, и практическую, науку наблюдения и опыта, постепенно принимает организационные формы. В первой половине XV в. возникают кружки ученых (пользующиеся иногда поддержкой князей и иных влиятельных лиц); которые получают название академий. Так, в 1438 г. Козимо Медичи основал во Флоренции Платоновскую академию, в 1478 г. в Риме возникает Академия святого Луки, в 1542 г. — Витрувиевская академия, затем Академия дей Линчей (1603) и Академия дель Чименто (1607). Не все академии оказались жизнеспособными, но некоторые из них сумели сплотить постоянные коллективы участников, получить финансовую поддержку от власти имущих и стать официальными научными учреждениями. Некоторые академии приняли на себя и образовательные функции. Так, в XVI в. Флорентийская академия искусств стала чем-то вроде политехнической школы: как и в университетах, здесь преподавалась математика, но уже не чистая (арифметика, алгебра, геометрия), а прикладная, которую можно было применять для решения задач техники и искусства.

Приближалась эпоха научной революции.

РЕВОЛЮЦИЯ В НАУКЕ

Открытие Коперника, остановившего Солнце и сдвинувшего Землю, было первой и решительной победой наблюдения и опыта над рассуждением. Великие географические открытия XV—XVI вв. и последовавшая колониальная экспансия вызвали приток золота в Европу, оживилась коммерческая деятельность, а следом за ней — производство средств потребления. Постепенно в недрах цехового ремесла развивается капиталистическая мануфактура, которая пока все еще основывается на ручном труде: машины продолжают заменять лишь физическую силу человека. По словам Маркса, «Мануфактурный период, быстро провозгласивший уменьшение рабочего времени, необходимого для производства товаров, своим сознательным принципом, спорадически развивает также употребление машин, особенно при некоторых простых подготовительных процессах, требующих большого количества людей и большой затраты силы. Так, например, в бумажной мануфактуре скоро стали сооружать особые мельницы для перемалывания тряпок, а в металлургии — толчеи для дробления руды... Очень важную роль сыграло спорадическое применение машин в XVII столетии, так как оно дало великим математикам того времени практические опорные пункты и стимулы для создания современной механики»¹.

На Руси XV—XVII вв. ремесло постепенно преобразуется в мелкотоварное производство; на базе последнего возникают мануфактуры. Уже в XV в. здесь имелаась казенная промышленность, вначале оборонная. Первые пушки на Руси появились в 1389 г., в последний год княжения Дмитрия Донского. В летописях под этим годом записано: «...вывезли из немец арматы на Русь и огненную стрельбу и от того часа уразумели из них стреляти». В XV в. было налажено литье пушек, к концу века возникают «пушечные дворы» (заводы) в Москве и других городах. В XVI в., при Иване Грозном, военной промышленностью ведают уже три приказа: Пушкарский, которому подчинены пушечные дворы, пороховые мельницы, «пушечный наряд», постройка крепостей; Бронный, ве-

давший изготовлением брони, шлемов, сабель, луков и т. д., и Оружейный, в ведении которого находились изготовление огнестрельного оружия (кроме пушек) и Оружейная палата — арсенал. На Московском пушечном дворе в 1586 г. мастер Андрей Чохов отлил царь-пушку весом 2400 пудов, калибром 35 дюймов (около 800 мм) с ядрами по 120 пудов. Здесь же в 1615 г. была отлита первая пушка с винтовой нарезкой. Уже в середине XVI в. в распоряжении Пушкарского приказа было свыше 2000 пушек.

Развивалось не только военное производство. В Москве работали Хамовный двор — мастерские для производства полотна, мануфактуры и мельницы для производства бархата, кожи и стекла, бумажная мельница на Яузе, Печатный и Денежный дворы. Монету, главным образом медную, чеканили и в других городах.

Все эти мануфактуры не могли обойтись без достаточно развитой механической техники: подъемных приспособлений (которые изображены на многих гравюрах в книгах духовного и исторического содержания), печатных, маслобойных и монетных прессов, ткацких станков, бумажных и пороховых толчей, обычно с кулачковым приводом, и т. п. В качестве энергетической системы применялись водяные колеса-приводы с использованием силы людей и животных, ветряные мельницы (последние — почти исключительно при помоле муки). Такой была техника казенных, частных и монастырских заводов. Так, в XVI в. в районе Вычегды действовала железоделательная мельница с водяным колесом, приводившим в действие молот. В первой четверти XVII в. водяными колесами приводились в действие установки медеплавильных и железоделательных заводов в Туле, под Москвой и на Урале.

С западноевропейской техникой XVI—XVII столетий можно познакомиться по сочинениям инженеров того времени, Агостино Рамелли (1530—1590), Генриха Цейзинга (ок. 1560—1613), Саломона де Ро (1576—1630), Каспара Шотта (1591—1670) и др. Теоретическое сочинение по механике «Теория равновесия простых машин» написал около 1577 г. Гвидо Убальдо дель Монте (1545—1667), тосканский военный инженер. Через 20 лет, в 1597 г., Буонайуто Лорини, военный инженер, служивший у Козимо Медичи, выпустил трактат «Об укреплениях», в ко-

¹ Маркс К., Энгельс Ф. Соч., т. 23, с. 360—361.

тором свой практический опыт подтверждает теоретическими изысканиями. Он обращает внимание, в частности, на тот факт, что при расчете равновесия рычага нельзя учитывать лишь вес нагрузок и их расстояние от точки подвеса — следует учитывать и собственный вес рычага.

Увеличиваются познания и в строительной механике. Итальянский математик Бенедетти знает основания теории статических моментов; он предполагает, что в безвоздушном пространстве тела падают с одинаковой скоростью вне зависимости от их веса. Голландский инженер Симон Стевин (1568—1620) разработал теорию наклонной плоскости и установил, что если три силы находятся в равновесии, то их величины относятся как стороны треугольника, параллельные этим силам.

Возникает много новых машин, оснащенных новыми механизмами. Рамелли в сочинении «Разнообразные и искусные машины» (1588) приводит изображение передаточных механизмов — зубчатых, винтовых, цепных и описывает различные конструкции насосов. Профессор математики Вюрцбургского университета Шотт описывает сложные установки, например систему механизмов пивоваренного завода (ему, в частности, принадлежит первое в научной литературе описание опытов Герике с магдебургскими полушариями).

Развитие профессиональной деятельности, связанное с усложнением машин, заставило обратить внимание и на право собственности по отношению к профессиональным секретам. Отдельные патенты выдавались и в средние века. К концу XV в. Венеция имела уже достаточно развитую патентную систему. В XVI в. патенты и привилегии широко выдаются во Франции, Нидерландах, в империи Габсбургов.

С конца XVI и на протяжении всего XVII в. в теоретическом естествознании, математике и механике происходит длинная цепь открытий и выработка теорий. Результатом этой большой и интенсивной деятельности ученых оказалась новая система миропознания. Соответствующий период принято называть поэтому научной революцией.

Революция в науке началась с открытия Коперника. Затем Кеплер «упорядочил» Солнечную систему. Великий механик и астроном, императорский математик по должности, Иоганн Кеплер (1571—1630) прожил очень труд-

ную жизнь. Он был протестант, жил в католической стране, нередко подвергался гонениям за свои религиозные убеждения, состоял на императорской службе, но годами не получал жалованья и скончался, оставив императора Священной римской империи своим должником.

Наибольшее значение для механики имели три закона движения планет вокруг Солнца, открытые Кеплером:

I. Планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце;

II. Площади, описываемые радиусом-вектором планеты в равные времена, равны между собой;

III. Квадраты времен обращения планет относятся как кубы их средних расстояний от Солнца.

Первые два закона были опубликованы Кеплером в сочинении «Новая астрономия» в 1609 г., третий — в 1619 г. в трактате «Гармония мира». В динамике Кеплер высказал ряд мыслей об инерции и о притяжении тел как о всеобщем законе. Приливные волны он пояснял притяжением Луны. Однако он не был последователен в своих теориях, и мысли, высказанные им, разработали другие ученые.

Зачинателем и теоретиком экспериментального метода в естественных науках считается английский философ и государственный деятель Френсис Бэкон (1561—1626). Сам он мало чего добился в естествознании, однако влияние его на науку было значительным. Он обосновал экспериментальный метод исследования, объявил физику «матерью всех наук» и отделил науку от теологии: для того времени это было смелым поступком. Его основной идеей было заставить природу служить человеку. Призывы Бэкона прозвучали вовремя: начиная с XVII в. экспериментальный метод становится господствующим и определяющим, а главные интересы ученых сводятся к задачам механики. Даже революция в математике была обусловлена развитием науки о движении и о силах, его производящих.

Постановка и решение задач механики ведутся широким фронтом: систематизируются познания из статики и полученные законы прилагаются к проблемам прочности материалов и гидравлики. На основе динамических идей схоластов разрабатывается динамика, которая сразу же распространяется на задачи баллистики, решаются некоторые задачи геометрии движений, и, пожалуй, лишь уче-

ние о машинах остается на уровне чистого описания, так как рабочие скорости ничтожны и для расчета действия машин достаточно элементарных законов статики.

В 1586 г. в Лейдене был опубликован на фламандском языке трактат о статике, который написал Симон Стевин. Автор стремился «очистить» статику от несвойственных ей учений, поэтому он «отбрасывает» движения машин, сопротивления в машинах и те доказательства теорем статики, которые основаны на рассмотрении виртуальных скоростей. Интересно его решение задачи о равновесии тела на наклонной плоскости, при котором он исходит из предположения о невозможности вечного движения: таким образом, в этом отношении он является предшественником Леонардо да Винчи и Кардано.

Стевин внес также важный вклад в гидростатику: он предложил принцип отверждения, в соответствии с которым твердое тело плотности, равной плотности воды, будет находиться в воде в состоянии равновесия.

В 1589 г. кафедру математики в Пизанском университете получил молодой ученый из Флоренции Галилео Галилей (1564—1642). Сам Галилей изучал в Пизанском университете сначала медицину, а затем математику. В этом нет ничего странного: в то время врачи не столько изучали человеческое тело, сколько занимались астрологией — определением людских судеб по взаимоположению звезд и планет. А для овладения астрологией нужны были познания в области математики, поэтому зачатую врачей называли математиками, а иногда они действительно становились таковыми. Впрочем, к математике тогда относились механика, оптика, гидравлика, астрономия и значительная часть технических знаний. Физикой тогда назывались элементы знаний из биологии, физиологии, геологии и т. п., т. е. то, что можно было бы назвать естественной историей.

Галилей также читал врачам математику, но основное внимание он уделял механике. Первые его опыты были обусловлены традиционной механикой схоластов, но он скоро отошел от нее и приступил к самостоятельным исследованиям. Его заинтересовала практическая механика.

Мы видели, что не без влияния опыта практиков у ученых Ренессанса возникали идеи, которые можно было бы отнести к прикладной механике. Так, Бенедетти пользовался статическими моментами, имел понятие о силе

инерции и о центробежной силе, знал, что в безвоздушном пространстве все тела падают с одинаковой скоростью вне зависимости от веса.

В 1594 г. Галилей прочел в Падуанском университете курс лекций по механике, опубликованный в Париже лишь в 1634 г. Содержание этих лекций относится, собственно, к статике машин. Но те машины, которые знал Галилей, служили обычно для подъема больших грузов посредством малых сил в течение длительного времени. Поэтому, следуя учению Аристотеля, Галилей оценивает действие машины с помощью «момента» — произведения величины груза на скорость. Он указывает, что при рассмотрении машины нужно знать следующие составляющие: переносимый груз, перемещающую его силу, расстояние переноса и время, которое следует на это затратить. Большое внимание Галилей уделяет изучению движения тел по наклонной плоскости. Он приходит к формулировке закона падения тел: «Расстояния, пройденные при естественном движении, находятся в двойном отношении к длительности падения. Следовательно, расстояния, пройденные в равные времена, относятся между собой как последовательность нечетных чисел, начиная от единицы».

Закон падения тел стал основополагающим положением новой динамики. Галилей высказал также и другие важные положения, в частности закон независимого действия сил и закон инерции, который Ньютон назвал галилеевым законом инерции: «Тело, на которое не действует никакая результирующая сила, находится в состоянии покоя или же движется в пространстве по прямой с неизменной скоростью». Галилей дал решение задачи о полете снаряда, указав, что горизонтально брошенное тело будет двигаться по параболе, которая является результирующей двух составляющих равномерного движения по горизонтальной прямой и равномерно-ускоренного движения по вертикали; сопротивлением воздуха он пренебрегал.

Галилей был горячим приверженцем учения Коперника, что было весьма небезопасно, поскольку католическая церковь осудила это учение как несовместимое с догматами священного писания и в 1616 г. сочинение Коперника было внесено в список запрещенных книг. Однако Галилей не только продолжал всей силой своего авторитета поддерживать учение Коперника, но и опубликовал в

1632 г. «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой». Это сочинение также вскоре попало в список запрещенных книг, а Галилея привлекли к суду инквизиции и заставили отречься от отстаиваемой им теории. Семидесятилетний ученый был подвергнут домашнему аресту, под которым и жил последние восемь лет своей жизни. В этот период он написал еще одну книгу — «Рассуждения и математические доказательства о двух новых науках», изданную в Лейдене в 1638 г.; с этой книги начинается история механики материалов и строительной механики. Галилей выясняет здесь понятия растяжения и сжатия тел под действием нагрузки, а также исследует изгиб консольной балки и балки на двух опорах. Правда, не все его выводы оказались правильными: он, например, предположил, что напряжения распределяются равномерно по сечению и в случае растяжения, и в случае изгиба.

Выводы Галилея очень важны. Он выяснил, в частности, что полые балки прочнее тех, которые имеют сплошное сечение. Он указал, что такие балки «находят разнообразнейшие применения в технике, а еще чаще в природе в целях большего увеличения прочности без возрастания в весе: примером тому могут служить кости птиц и разного рода тростники, и те и другие отличаются большой легкостью и в то же время хорошо сопротивляются как изгибу, так и излому. Так, если бы пшеничный стебель, которым поддерживается превышающий его по весу колос, был сформирован из того же количества материала сплошным стержнем, то он смог бы оказать меньшее сопротивление изгибу и излому». И Галилей приходит к выводу: «Вы теперь ясно видите невозможность как для искусства, так и для природы увеличивать размеры своих произведений до чрезмерно огромных... сама природа не производит деревьев необычайной величины, иначе ветви их поломались бы от собственной тяжести; невозможно было бы также создать и скелет человека, лошади или какого-либо другого животного, так чтобы он сопротивлялся и выполнял бы свои нормальные функции, если бы размеры этих живых существ были бы непомерно увеличены в высоту; такое увеличение в высоту могло бы оказаться осуществимым лишь в том случае, если бы для них был использован более твердый и прочный материал или если бы их кости были увеличены

также и в ширину, отчего по форме и по облику эти существа стали бы походить скорее на чудовищ...»²

В области теории удара продвижению механики вперед способствовали работы чешского ученого профессора пражского Карлова университета Иоганна Маркуса Марци (1595—1667). Марци рассматривает соударение сферических твердых тел, движущихся по прямой друг против друга, и формулирует четыре закона, разрешающие эту задачу.

Исследования Галилея в области механики продолжил его ученик Эванджелиста Торричелли (1608—1647). Он обобщил задачу о брошенном теле, рассмотрев случай, когда тело брошено под углом к горизонту. Он занимался также механикой жидкости; так, он рассмотрел задачу об истечении жидкости через узкое отверстие, находящееся в нижней части сосуда. По аналогии с падением твердых тел он поставил вопрос: до какой высоты смогла бы подняться жидкость, вытекающая из сосуда, если струю направить вверх? Это исследование послужило основой для создания новой ветви механики — гидродинамики.

Как мы видели, Галилей в своих рассуждениях пользуется примерами из живой природы. В этом отношении он не был одинок: до него подобным методом широко пользовался Леонардо да Винчи, а успехи механики побуждали и ученых-медиков искать применения ее законов к задачам физиологии. Выдающийся физиолог и врач Уильям Гарвей (1578—1657), открывший кровообращение, в 1628 г. пробовал количественно оценить поток крови в теле. Это учение, поясняющее физиологические процессы с точки зрения механики, получило название ятромеханики. Виднейшим представителем его был соученик Торричелли, медик и математик Джованни Альфонсо Борелли (1608—1679). Он свыше 20 лет преподавал математику в Мессинском университете, был избран в Академию дель Чименто. Его основное произведение «О движении животных» было издано в Риме в 1680—1681 гг. В своих исследованиях Борелли пользуется математическими расчетами. Так, рассуждая о возможности создания крыльев, способных поднять человека в воздух, он пишет:

² Галилей. Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки. М.—Л., ГГТИ, 1934, с. 247—248.

«Прежде чем ответить на вопрос, сможет ли человек летать с помощью своей силы, следовало бы сперва установить, имеет ли требуемую величину сила мускулов его груди (мощность которых можно оценить 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 весьма 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, невозможно, так как они не достигают и той части веса тела...»³ Отсюда следует, продолжает Борелли, что легенда об Икаре является всего лишь мифом. Поэтому для подъема человека в воздух нужно было бы применить иные средства, например поступать подобно рыбе, которая поднимается в воде с помощью своего плавательного пузыря. К человеку тоже можно было бы прикрепить сосуд с очень тонкими стенками и выкачать при помощи ртутного насоса из этого сосуда воздух. Но и это невозможно, так как сосуд должен иметь объем не менее 22 тыс. кубофутов и не найдется такого количества ртути, которое понадобилось бы для удаления из него воздуха.

Так рассуждал механик за 100 лет до полетов на воздушном шаре братьев Монгольфье. Рассуждения Борелли, несмотря на «доказательства невозможности», явились важным этапом по пути овладения природой.

В годы, когда уже началась научная революция и создание новой математики и механики быстро продвигалось вперед, ученых было не так много и они поддерживали связь друг с другом если не лично, то путем переписки. Переписка была единственным средством «экспресс-информации», поскольку научной периодики еще не существовало. Выдающуюся роль в объединении ученых сыграл Марен Мерсенн (1588—1648), школьный товарищ Декарта, математик, естествоиспытатель и философ. Мно-

го путешествуя по Италии и Голландии, он познакомился едва ли не со всеми выдающимися учеными того времени, состоял в переписке с Декартом, Кавальери, Ферма, Паскалем, Робервалем, Торричелли. В 1634 г. Мерсенн издал на французском языке «Механику» Галилея. Сам он занимался также многими вопросами механики: исследовал колебания и механику упругих тел, ставил опыты по гидравлике и гидродинамике. В работе «Физико-математические размышления» Мерсенн излагает учение Галилея о наклонной плоскости и о сопротивлении твердых упругих тел. В разделе, посвященном гидравлике и пневматике, сообщает о судах, плавающих под водой, и об опытах Корнелия Дреббеля (1572—1634), заинтересовавших многих современников. Гюйгенс в 1691 г. писал Папену, который также занимался опытами по подводному плаванию: «...Трубы для возобновления воздуха, которые должны держаться на легком куске дерева, плавающем на поверхности воды, могут, по моему мнению, выдать Ваше судно при приближении к неприятельским судам, если в это время не царит глубокая темнота. Судно Дреббеля не имело таких труб, как мне рассказывал мой покойный отец, который был в Лондоне в то время, когда Дреббель сам спустился в Темзу, так что на поверхности воды ничего не оставалось видно; через довольно долгое время он появился на поверхности в пункте, сильно удаленном от места погружения. Говорили, что он имел какое-то средство возобновлять воздух на своем судне, что является очень важным изобретением...»⁴

Благодаря осведомленности Мерсенна обо всех новостях науки своего времени, его широким связям, большому обаянию его личности он становится в центре оживленного обмена научными новостями. В его парижской квартире еженедельно собираются ученые, математики и физики, рассказывают о результатах своих исследований, обмениваются мыслями. Кружок ученых, созданный Мерсенном, продолжал собираться и после его смерти; в 1666 г. он получил правительственный статут и был преобразован в Парижскую академию наук.

Почти одновременно подобный кружок ученых возникает в Лондоне. В 1645 г. родственник Кромвеля, епи-

³ Borelli G. A. De motu animalium. Roma, 1680.— «Oswalds Klassiker», N 221. Leipzig, 1927, S. 33—34.

⁴ Цит. по кн.: Очерки по истории машиностроения. М.— Л., ГГТИ, 1933, с. 273.

скоп Честерский Джон Уилкинс вместе с несколькими математиками и врачами организовал группу, собирающуюся периодически для совместных бесед и обсуждения опытов на различные естественнонаучные темы. Вскоре кружок перебазировался в Оксфорд, где его участниками стали Роберт Бойль, Кристофор Рен, Уильям Петти и Роберт Гук. В 1660 г. кружок получил наименование Королевского общества и фактически стал высшим научным учреждением Англии. Первый устав его был составлен Робертом Гуком в 1663 г. В Уставе говорилось, что задачей Королевского общества является постановка опытов для «совершенствования познаний о натуральных объектах, а также познание всех полезных искусств, мануфактур, механической практики, машин и изобретений». Подчеркивалось, что занятия богословием, метафизикой, этикой, политикой, грамматикой, риторикой и логикой для общества нежелательны.

Одним из самых крупных мыслителей эпохи научной революции был друг Мерсенна Рене Декарт (1596—1650) — философ, физик, математик, физиолог. Его учение («картезианство») в значительной степени определило дальнейшее развитие естественных наук. Как ученый-физик, Декарт был материалистом, считал математику идеалом и образцом для всех наук.

Следует отметить, что научная революция мало что сделала в отношении терминологии точных наук, поэтому при чтении работ классиков науки следует иметь в виду несоответствие между применяемыми ими терминами. Это касается и понятия силы. Декарт называл силой произведение некоторого груза на величину его подъема (т. е. то, что мы сейчас называем работой). Он писал: «Сила, о которой говорю я, имеет всегда два измерения и не является той силой, которая действует в каждой точке для поддержания груза и которая всегда имеет одно измерение». Таким образом, сила Декарта отличается от момента (произведение груза на скорость) Галилея. Декарт указывал, что он в этом случае исключает рассмотрение скорости, так как иначе в понятие силы будет входить уже не два, а три измерения.

Декарт считал, что движение неуничтожаемо. В 1629 г. он писал по этому поводу Мерсенну: «Я предполагаю, что движение, однажды сообщенное какому-либо телу, постоянно останется при нем, если не будет изменено ка-

кой-либо иной причиной, иначе говоря, то, что начало двигаться в пустоте, будет двигаться бесконечно с той же скоростью». В связи с этим он предложил оценивать движение произведением массы на скорость (что сейчас называется количеством движения) и утверждал, что количество движения, содержащееся в мире, остается неизменным.

Декарт изучал также качание маятника и теорию удара. Но здесь его превзошел великий голландский ученый Христиан Гюйгенс (1629—1695), самый гениальный часовщик всех времен, по выражению А. Зоммерфельда.

Гюйгенс принимал участие в работе обеих европейских академий буквально со дня их основания: он был членом Лондонского королевского общества с 1663 г. и членом Парижской академии наук с 1666 г. В октябре 1666 г. Королевское общество объявило конкурс на решение задачи об ударе; в нем приняли участие математик Валлис (1616—1705), математик (позже архитектор) Рен (1632—1723) и Гюйгенс. В своих решениях Валлис рассмотрел соударение неупругих тел, а Рен и Гюйгенс — упругих.

В трактате «Механика, или О движении» (1669—1671) Джон Валлис различает в каждой машине движущую силу и сопротивление. Хотя, как и его современники, он рассматривает лишь «простые машины», его идея оказалась весьма плодотворной и, пройдя в своем развитии несколько этапов, легла в основу теории машин. При оценке действия сил он колеблется между галилеевым моментом (произведением груза на скорость) и произведением груза на высоту подъема. В конце концов он останавливается на втором варианте и при этом обобщает принцип Декарта, распространяя его (кроме сил веса) на иные виды сил.

«Гениальному часовщику всех времен» Гюйгенсу принадлежат и практические изобретения и глубокие теоретические исследования. Особенное значение для развития механики имел его трактат «Колебания в часах, или Геометрическое доказательство движения маятников в их применении к часам», опубликованный в Париже в 1673 г. В трактате пять частей. В первой части приводится описание новой конструкции маятниковых часов, в которой центр тяжести маятника движется по циклоиде. Вторая часть посвящена падению тяжелых тел и их движению по

циклоиде. Здесь Гюйгенс дополняет учение Галилея об ускоренном движении при свободном падении тел и при движении тела по наклонной плоскости с различными углами наклона. Падение тела по циклоидальному пути дает Гюйгенсу возможность доказать важное свойство циклоиды — что в безвоздушном пространстве она является таутохронной или изохронной. В третьей части дается математическая теория эволют и эвольвент, которая, помимо технического значения для часового дела, важна и для математики и механики: вместе с работами Мерсенна и Паскаля по теории рулетты она явилась исходной для кинематической и дифференциальной геометрии.

Четвертая часть трактата содержит учение о центре качаний. Эта проблема была поставлена Мерсенном в 1646 г., и в ее решении приняли участие Декарт, Роберваль и Гюйгенс, которому в то время было 17 лет. Декарт и Роберваль дали частные решения; решение Гюйгенса было общим. При этом Гюйгенс доказал теорему о том, что «сумма произведений масс на квадраты достигнутых ими скоростей остается одной и той же, будут ли массы двигаться связанными между собой или достигнут такой же высоты поодиночке» (позже Иоганн Бернулли показал, что эта теорема является общим законом природы, и назвал ее принципом сохранения живых сил). Для определения центра качаний физического маятника Гюйгенс пользуется отношением суммы произведений масс на квадраты расстояний к сумме статических моментов. Позже Эйлер назвал произведение массы тела на квадрат расстояния моментом инерции.

Пятая часть трактата посвящена теории центробежной силы.

Много внимания Гюйгенс уделил проблеме создания универсального двигателя. Вместе с Дени Папеном (1647—1712) он работал над сооружением пневматических и гидравлических машин. Сначала они ограничивались устройством насосов и фонтанов, но уже в 1675 г. Гюйгенс предложил построить машину, работающую силой взрыва пороха. При этом он составил программу работ, в которой предполагалось изучить также движущие силы воздуха, «гремучего» и водяного пара. Пороховая машина Гюйгенса была продемонстрирована на одном из заседаний Парижской академии наук. Позже Папен занялся изучением свойств водяного пара и построил действующую модель

паровой машины, а затем лодку с паровым двигателем. Однако крайняя бедность и отсутствие какой-либо помощи не дали ему возможности завершить свое изобретение.

К кружку Мерсенна принадлежали также два французских ученых, внесших большой вклад в создание механики, но очень различные по характеру и складу ума. Это были Паскаль и Роберваль.

Блез Паскаль (1623—1662) очень рано овладел науками. Восемнадцати лет он создал счетную машину, на которую получил королевскую привилегию. По-видимому, его попытка механизации счета была второй в истории мировой науки: первую счетную машину спроектировал в 1624 г. профессор Тюбингенского университета Вильгельм Шиккард (1592—1635). Однако он не построил своей машины, тогда как Паскаль сконструировал и построил свыше 50 моделей, пока не добился удовлетворительного результата. Машина Паскаля была суммирующей и состояла из системы зубчатых колес.

Существенным вкладом Паскаля в механику явились его исследования в области гидростатики (трактат «О равновесии жидкостей» вышел в свет в 1663 г., через год после его смерти). Паскаль занимался также экспериментальным исследованием веса и давления воздуха.

Выше мы говорили о работах Паскаля по теории кривых. Исследованием кривых, в частности циклоиды, занимался также профессор математики Роберваль (1602—1675), также противник картезианства. Он, одновременно с Торричелли, разработал кинематический метод проведения касательной к кривой, с помощью которого построил касательные к большому числу кривых. Одновременно с итальянским математиком Бонавентурой Кавальери (1598—1647) Роберваль разработал так называемый метод неделимых, развитие которого привело к созданию анализа бесконечно малых.

Робервалю принадлежит едва ли не первое в истории механики определение силы. По его словам, сила «есть качество, посредством которого тело стремится переместиться в другое место, будет ли это место внизу, сбоку или сверху и независимо от того, присуще ли это качество самому телу или сообщено ему извне». Таким образом, Роберваль вносит в понятие силы общность и распространяет его на все возможные причины, не ограничиваясь

силой веса. Роберваль был хорошим экспериментатором и изобрел несколько приборов, в частности ареометр и «весы Роберваля». Занимался он и исследованиями маятниковых часов.

В кружке Мерсенна принимал участие физик Эдм Мариотт (1620—1684) и стал затем одним из первых членов Парижской академии наук. Это был механик очень широкого диапазона: занимался вопросами механики твердого тела, механики жидкостей и газов, построил теорию удара, много экспериментировал: результатом его опытов с газом (воздухом) явился известный закон Бойля — Мариотта. Мариотт изобрел баллистический маятник. В ходе проектирования водопровода для Версальского дворца Мариотту пришлось заняться теорией изгиба балок. Он убедился при этом, что теория Галилея неверна, напряжения при изгибе распределяются по сечению неравномерно: верхние волокна балки растягиваются, а нижние — сжимаются. Он установил также, что балка с заделанными концами выдерживает вдвое большую нагрузку, чем свободно лежащая на опорах. Исследовал он и прочность труб на разрыв под действием внутреннего давления.

Один из основателей Королевского общества Роберт Бойль (1627—1691), физик, механик и химик, независимо от Мариотта открывший закон изменения объема газа от изменения давления, был приверженцем механицизма. Все явления, включая и химические, он объяснял с точки зрения механики. В 1658 г. он познакомился и подружился с Гуком, вместе с которым работал над усовершенствованием воздушного насоса. В 1662 г. Бойль рекомендовал Гука в Королевское общество на пост куратора экспериментов; с того времени и до самой смерти Гук был одним из ведущих и во всяком случае самым деятельным членом Общества.

Роберт Гук (1635—1703) — крупнейший английский ученый конца XVII в. — имел чрезвычайно широкие научные интересы. Он занимался физикой, механикой, биологией, геологией, физиологией, астрономией, к тому же был практикующим врачом и профессором геометрии. Вместе со своим другом Реном он участвовал в восстановлении Лондона после великого пожара 1666 г. в качестве одного из ведущих архитекторов и городского наблюдателя за строительными работами. С 1662 по 1677 г.

был куратором экспериментов в Королевском обществе и поставил множество опытов. Среди его многочисленных изобретений немало относится к механике: анкерный ход часов, пружина баланса, насосы, приборы для испытания материалов, часовой привод телескопа, «шарнир Гука».

Важнейшим достижением Гука была разработанная им доктрина всемирного тяготения. Впервые он высказал свои соображения относительно гравитации в очень коротком сообщении, прочитанном в Королевском обществе весной 1666 г. Он объяснил движение планет совместным действием гравитации и силы инерции, поставил проблему происхождения гравитации и предположил ее колебательный характер. К 1670 г. Гук установил универсальный характер тяготения. За исключением, быть может, Ньютона, он был единственным мыслителем, который ясно и отчетливо сформулировал эту доктрину. По-видимому, между 1675 и 1679 г. Гук разработал и ее математическую часть.

Другим открытием Гука, также своевременно не оцененным, было объяснение им света как «весьма коротких колебательных движений, совершающихся в поперечных направлениях к линиям распространения света». Гук установил также закон пропорциональности между величиной сил и величиной производимых ими деформаций, носящий его имя.

Полной противоположностью Гуку был Исаак Ньютон (1642—1727) — настойчивый, замкнутый, терпеливый, точный в исследовании и эксперименте, умевший начать работу и довести ее до конца. В 1672 г. он был избран членом Королевского общества, а с 1703 г. до конца жизни состоял его президентом.

Значение Ньютона для дальнейшего развития науки огромно. Его труд «Математические основания натуральной философии» (1687) как бы завершил научную революцию и явился основой для создания не только ньютоновской механики, но и нового миропонимания. Вплоть до разработки теории относительности ньютоновская механика была единственной теорией всех земных и небесных движений; ее значение для техники остается непоколебленным.

Ньютон сформулировал закон всемирного тяготения, по-видимому, независимо от Гука и в значительно более

общей форме. Им были установлены три знаменитых «аксиомы, или закона, движения»:

I. Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

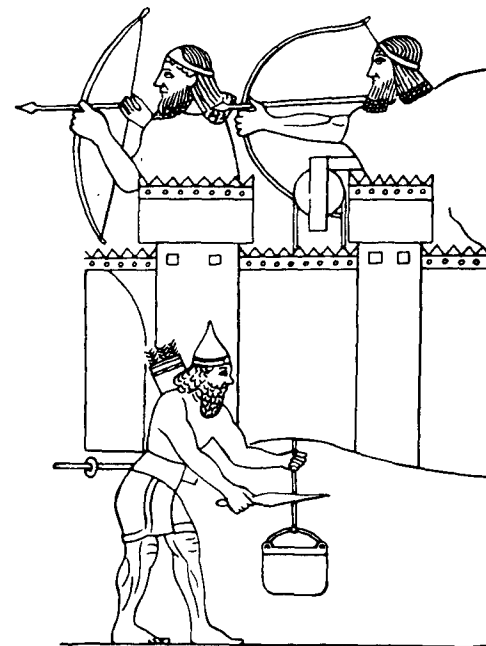
II. Изменение количества движения пропорционально приложенной действующей силе и происходит по направлению той прямой, по которой силы действуют.

III. Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны.

«Математические основания» состоят из трех книг: первая посвящена теории всемирного тяготения, вторая — учению о сопротивлении среды, третья — небесной механике. Другие сочинения Ньютона касались различных вопросов физики (в особенности оптики) и механики. Он занимался также теорией кривых, теорией перспективы. В «Математических основаниях» он излагает принципы метода флюксий и основную теорему этого метода. По словам Ньютона, метод флюксий был изобретен им в 1665 г., в 1666 и в 1667 гг. он написал на эту тему два небольших трактата, оставшихся в рукописи. Метод флюксий — ньютоновский вариант анализа бесконечно малых — стал объектом спора о приоритете, возникшего между Ньютоном и Лейбницем в 1699 г.

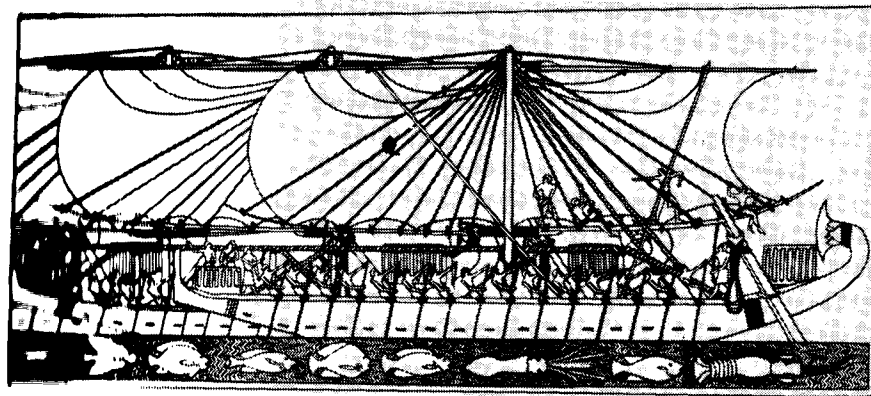
Готфрид Вильгельм Лейбниц (1646—1716) был ученым-универсалом. Он был математиком, механиком, физиком, философом, занимался логикой, юриспруденцией, историей и богословием, а также психологией, геологией и языкознанием. Он изобрел счетную машину, причем такую, от которой ведут свой род почти все аналогичные изобретения XVIII—XIX вв., занимался химией, медициной и горным делом, был дипломатом и принимал участие в организации академий. В 1700 г. он организовал Берлинскую академию наук и стал ее первым президентом. В 1673 г. стал членом Лондонского королевского общества, в 1700 г. — иностранным членом Парижской академии наук.

В 1684 г. Лейбниц опубликовал в лейпцигских «Acta Eruditorum» свой метод дифференциального исчисления. Он создал теорию цепной линии, занимался вопросами



Древнейшее изображение блока

Египетский корабль эпохи XIV династии (2-я половина XIX в. до н. э.)



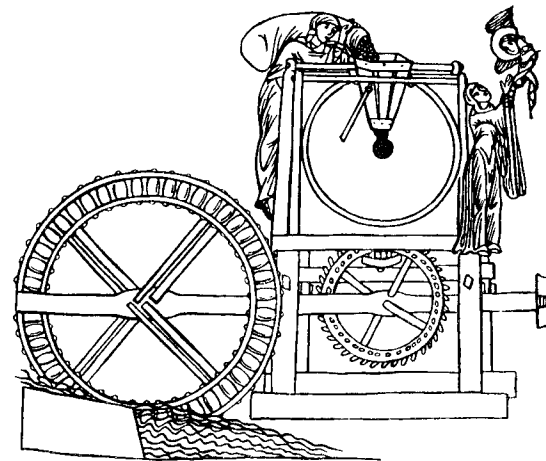


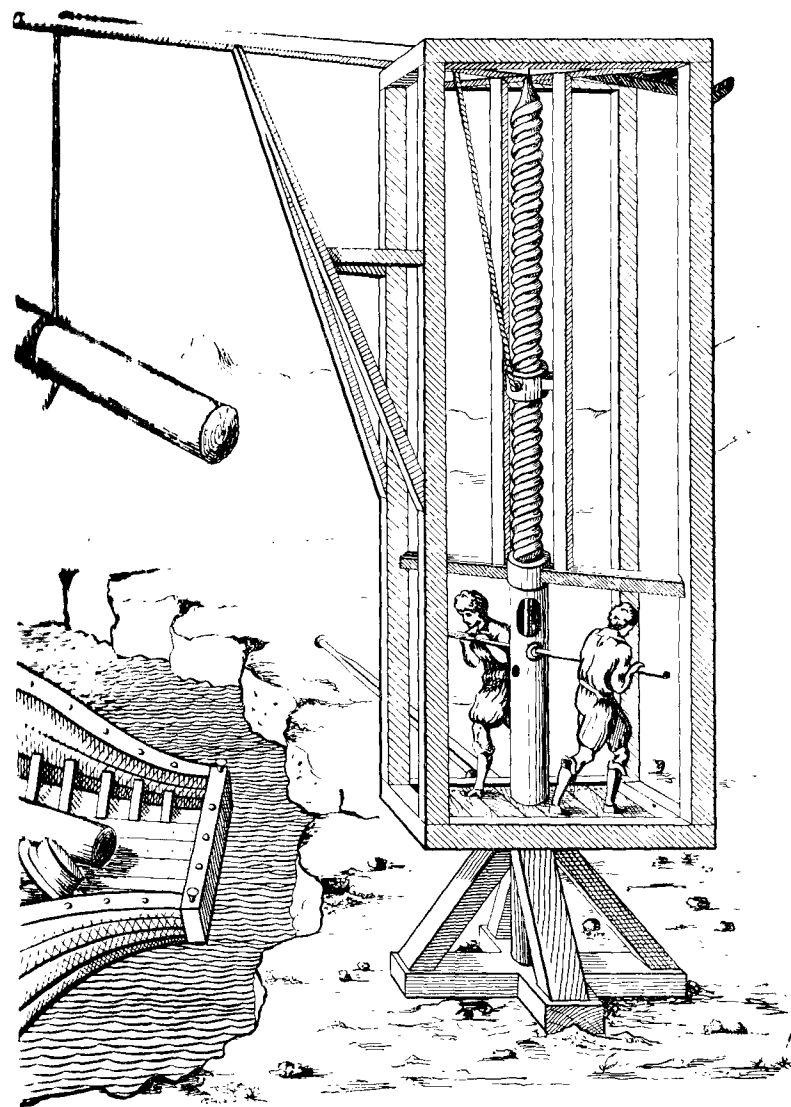
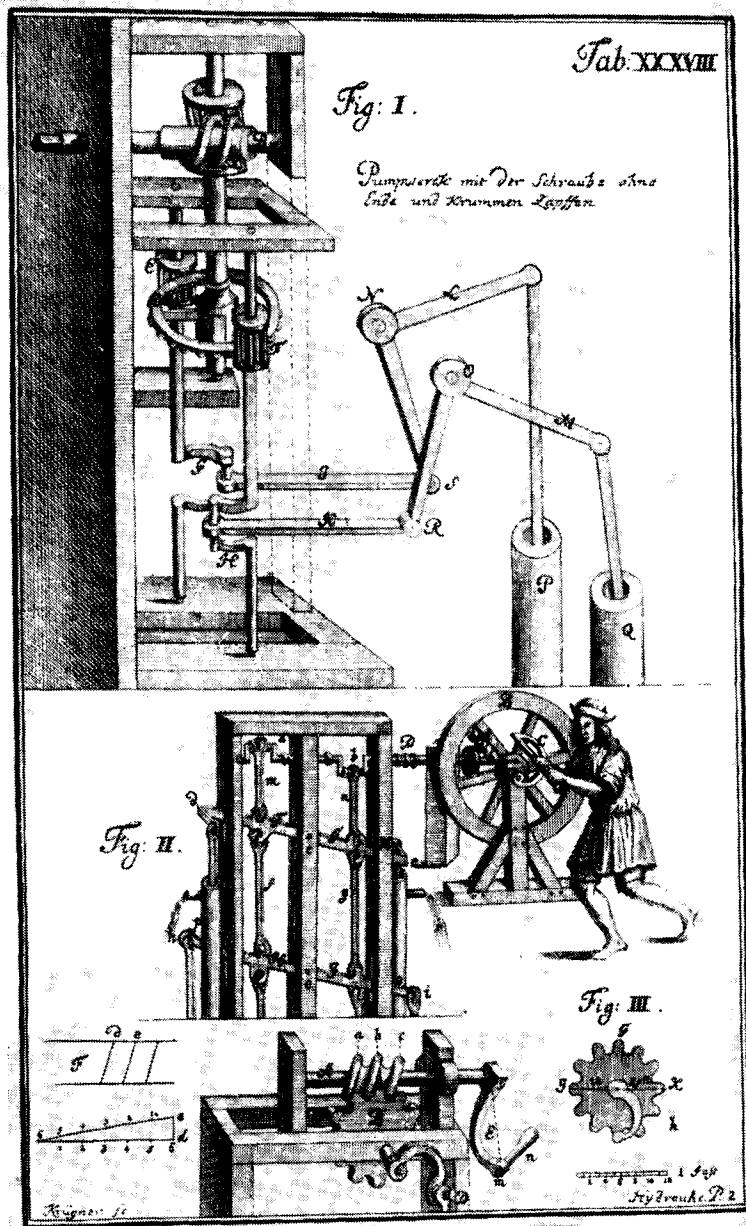
Собор св. Софии в Константинополе (VI в.)



Постройка моста при осаде крепости во времена Карла Великого (начало IX в.)

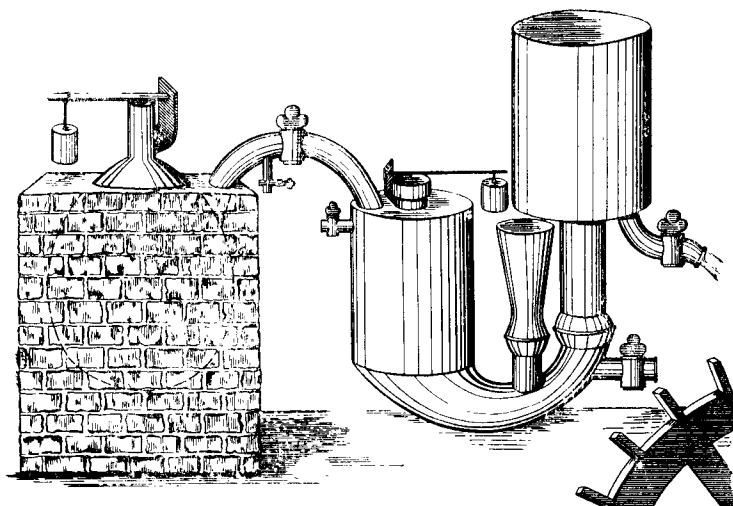
Водяная мельница (по Герарду Брюссельскому, около 1160 г.)





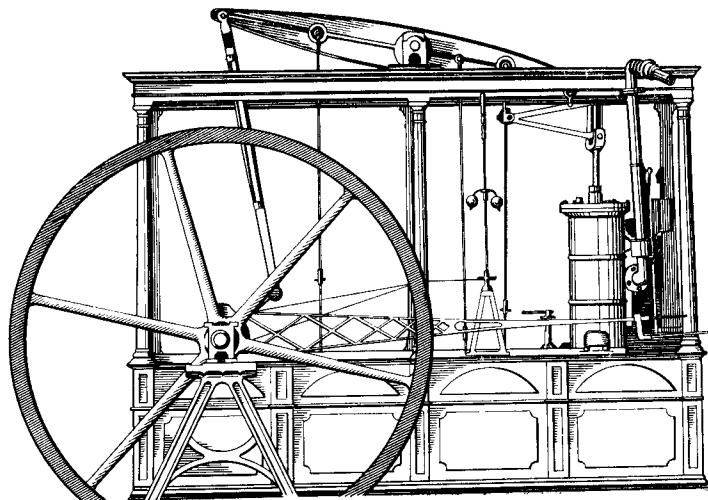
Подъемный кран (XVII в.)

Приводы насосов (XVI в.)



Паровая машина Папена

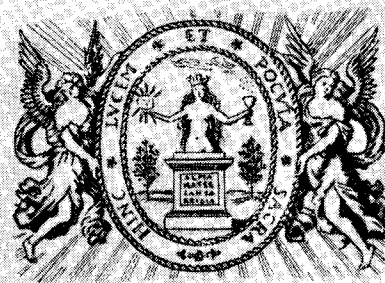
Паровая машина Уатта



PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

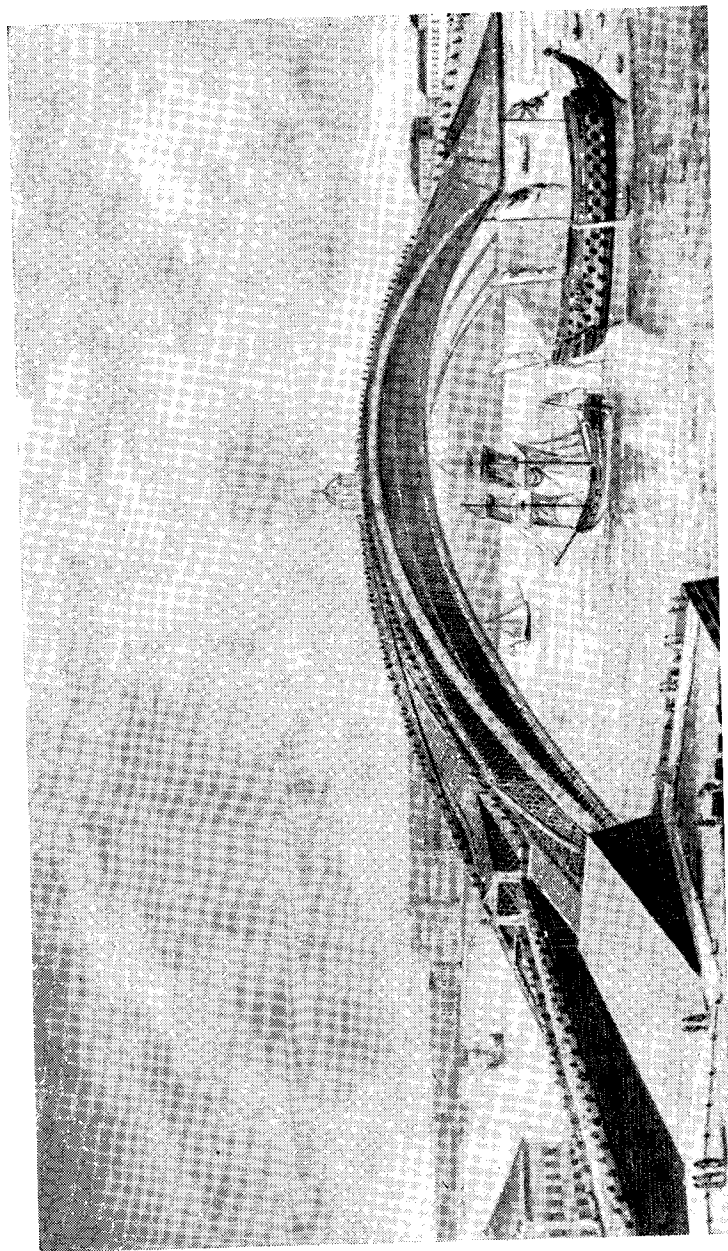
AUCTORE
ISAACO NEWTONO,
EQUITE AURATO.

EDITIO SECUNDA AUCTION ET EMENDATION.



CANTABRIGIÆ MDCCXIII.

Титульный лист «Математических оснований натуральной философии» Ньютона

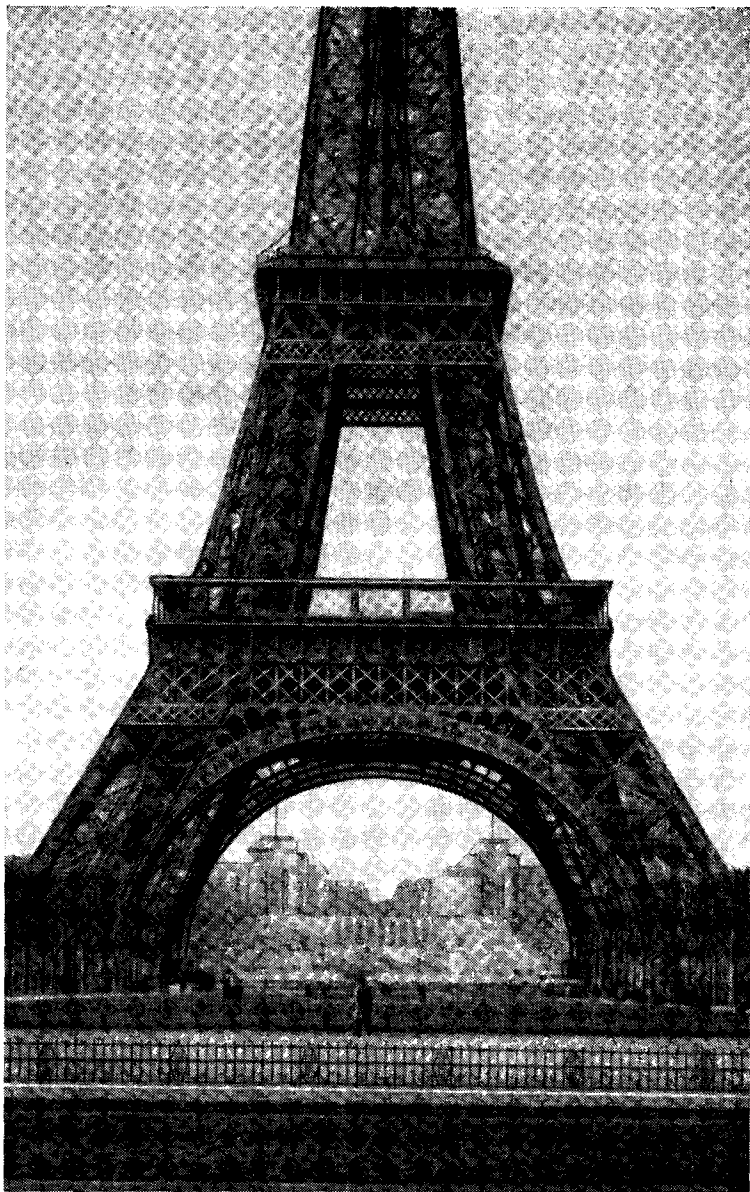


Проект И. П. Кулибина: мост через Неву

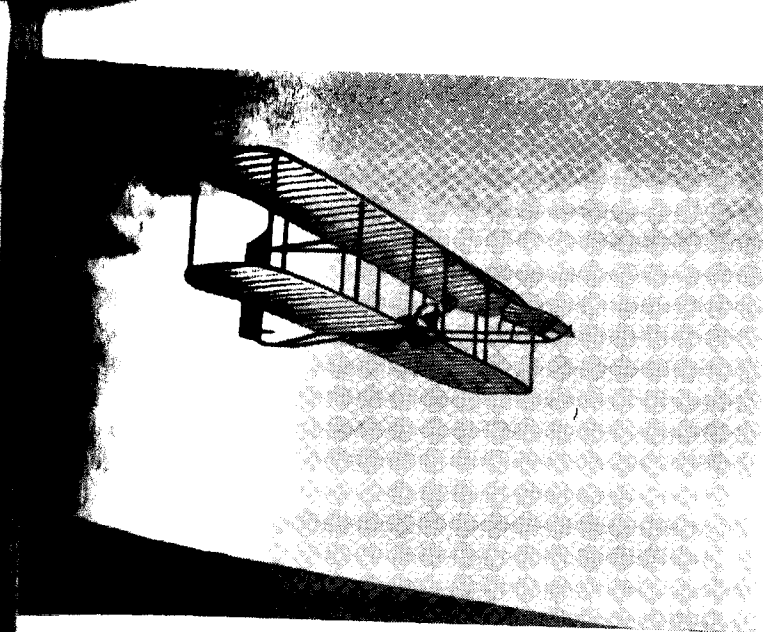


«Великий всадник»

PETRO PRIMO
CATHARINA SECUNDA
MOCCISINUM

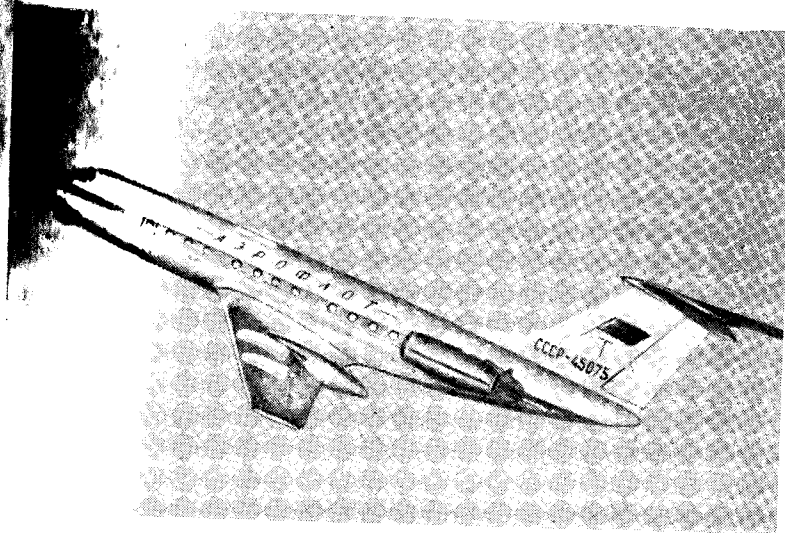


Эйфелева башня, 1887—1889 гг.



Авионы братьев Райт

Импульс Т-104





«Мать-Родина» — главный монумент памятника-ансамбля героям сталинградской битвы, 1967 г.

геометрии, разработал основы символического исчисления, ему принадлежит первый опыт алгебраизации анализа.

В механике Лейбниц был принципиальным противником Декарта. В мемуаре «Короткое доказательство одной достопамятной ошибки Декарта и других ученых» (1686) он, следуя Гюйгенсу и обобщая его результаты, вводит в механику понятие живой силы. Статья эта вызвала большую полемику, длившуюся в течение всего XVIII в., отголоски которой дошли и до XIX в. В значительной степени основанием для дискуссии послужило различное понимание слова «сила»: Лейбниц понимал его в смысле, близком к современному, но пользовался также выражением «живая сила». Он ввел кинетическую энергию как меру движения и подошел к формулировке закона сохранения энергии при взаимодействии тел. Картезианцы же применяли в качестве меры движения произведение массы на скорость, т. е. количество движения. Впрочем, решения задач, выполняемых тем и другим методом, были совершенно одинаковыми.

В 1711, 1712 и 1716 гг. Лейбниц встречался с Петром I и давал ему советы относительно организации Академии наук в России.

Революционные преобразования науки, происходившие в XVII в., не коснулись техники того времени, и она продолжала очень медленно развиваться, без существенных результатов. Попытки создания универсального двигателя ни к чему не привели, да он и не был нужен: водяные колеса и ветряные мельницы обеспечивали нужное количество энергии для приведения в действие несложных технологических установок. Подъемные и горные машины оставались такими же, как и в прошлом веке, переиздавалось сочинение Рамелли, а новые книги, написанные о машинах в XVII в., ничем существенным от него не отличались.

По практической механике не стоит на месте: еще в конце XVI в. возникает новый архитектурный стиль — барокко, в XVII в. «овладевающий» всей Европой. Глубокие познания архитекторов в механике позволили им, упростив общую конфигурацию здания и его внешнюю форму, создать большие и лучше освещенные внутренние площади. Однако механические средства строителей не изменились. Например, когда папа Сикст V в 1586 г. решил установить перед собором святого Петра в Риме

египетский обелиск высотой 23 м, весом 327 т, то архитектор Доменико Фонтана выполнил эту работу с помощью лебедей, использовав силу 800 рабочих и 140 лошадей. Почти через 100 лет после этого для подведения воды к фонтанам в Версальском парке была сооружена гидравлическая установка, которую строили с 1681 по 1685 г. Установка состояла из 14 водяных колес диаметром по 12 м, приводивших в движение 221 насос; насосы располагались на трех уровнях и поднимали воду на 162 м. Стоила установка уйму денег, а мощность ее составила всего 80 л. с., т. е. примерно столько, сколько дает двигатель 3,5-тонной автомашины.

Искусство барокко, рассчитанное на удовлетворение вкусов аристократии, развивалось, усложняя интерьер и внешние формы, а это потребовало разработки новых инженерных решений и создания механики материалов. Здания, сооруженные зодчими, пришедшими в архитектуру от науки, например Реном и Гуком в Лондоне, не имеют каких-либо принципиальных отличий, очевидно, практические познания архитектора не смешивались с расчетами теоретика. Однако практика и ее запросы, несомненно, явились одной из побудительных причин для теоретических и экспериментальных выводов.

Развитие торговли в Западной Европе потребовало улучшения дорог, в первую очередь водных, т. е. рек и каналов, а также морских портов. Все это явилось первопричиной развития гидравлики. Повышение мощности гидравлических установок стимулировало становление гидродинамики, развитие артиллерии влекло за собой интерес к баллистике и повышение точности баллистических решений. Таким образом, в эпоху научной революции были заложены основы различных направлений прикладной механики, которой, впрочем, предстояло еще развиваться более столетия, прежде чем она достигла уровня науки.

Кардинальные изменения происходят в XVII в. не только в области науки, но и в области искусства. Одновременно с созданием нового архитектурного стиля возникает и новое направление в живописи — реализм Караваджо, Веласкеса, Рубенса, Ван-Дейка. Меняется содержание живописи: жанровые сцены, изображение простых людей с их повседневными заботами проникают даже мифологическую и религиозную тематику. Стремление

реализму характерно для искусства барокко и очень сродни событиям в науке того времени. И тут и там превалирует эксперимент; проективная геометрия, созданная художниками-учеными, дает им возможность отобразить трехмерное пространство на плоскость. Модель не улучшают, а точно переносят на холст все достоинства и недостатки.

Как видим, наука XVII в. низвела Землю до уровня рядовой планеты, но одновременно поставила человека в центр событий — «на центральное место».

РЕВОЛЮЦИЯ В ТЕХНИКЕ

Важнейшим событием XVIII в. в области механики была революция в средствах производства — промышленный переворот, который начался в 30-х годах в Англии, самой развитой стране того времени. Сущностью переворота и его началом явилось изобретение таких технологических машин, которые смогли заменять уже не только физическую силу человека, но и его руку, его умение. Эти машины появились прежде всего в хлопчатобумажной промышленности, там, где ручной труд уже не мог удовлетворить быстро растущий спрос на ткани. Как заметил Маркс, о промышленной революции оповестил Джон Уайетт в 1735 г. своим изобретением прядильной машины. «Машина для того, чтобы прядь без помощи пальцев», — говорилось в патентной заявке Джона Уайетта.

«Всякое развитое машинное устройство, — пишет Маркс, — состоит из трех существенно различных частей: машины-двигателя, передаточного механизма, наконец машины-орудия, или рабочей машины. Машина-двигатель действует как движущая сила всего механизма... Передаточный механизм, состоящий из маховых колес, подвижных валов, шестерен, эксцентриков, стержней, передаточных лент, ремней... регулирует движение, изменяет, если это необходимо, его форму... 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. Промышленная революция в XVIII веке исходит как раз от этой части — от машины-орудия. Она же и теперь образует всякий раз исходный пункт при превращении ремесленного или мануфактурного производства в машинное производство»¹.

Развитие одних отраслей техники влечет за собой развитие других — получается нечто вроде цепной реакции. Усиливается мощь артиллерии — и артиллеристы советуются с механиками, как лучше поразить цель. Артиллерия дробит стены крепостей — и военные инженеры думают над тем, как улучшить оборонительные и фортификационные сооружения. Бездорожье мешает торговле и передвижениям войск — усиливается строительство каналов и портов, появляются новые машины, прообразы современных экскаваторов и землечерпалок, начинается строительство сухопутных дорог. В конце XVIII в. человек на воздушном шаре поднимается в воздух — возникает воздухоплавание. Появление технологических машин заставляет подумать об универсальном двигателе — начинается интенсивная работа над изобретением и усовершенствованием паровой машины. Увеличивается потребность в металле — развивается горнозаводская и металлургическая механическая техника. В связи со всем этим возникает нужда в инженерах (военных, горных и путейских), которых до тех пор готовили путем индивидуального ученичества, поэтому в XVIII в. повсеместно организуются технические школы. Впервые они появились в России в первый год века: Петру I очень нужны были инженеры всех специальностей, а ждать он не умел и не любил.

Развитие механики в XVIII в. в значительной степени находилось под влиянием школы Бернулли. Братья Бернулли, Якоб (1654—1705) и Иоганн (1667—1748), явились родоначальниками целой династии математиков и механиков. В области точного естествознания в XVIII в. работали: племянник Якоба и Иоганна Бернулли — Николай I (1687—1759), сыновья Иоганна — Николай II (1695—1726), Даниил (1700—1782) и Иоганн II (1710—1790), сыновья Иоганна II — Иоганн III (1744—1807) и Якоб II (1759—1789). К школе Бернулли при-

надлежали также ученики Иоганна I — Г. Ф. Лопиталь (1661—1704) и Леонард Эйлер (1707—1783), слушавший его лекции в Базельском университете.

После Ньютона и Лейбница братья Бернулли и Лопиталь были первыми математиками, овладевшими техникой дифференциального и интегрального исчисления. С помощью нового математического аппарата они решили несколько важных задач механики. Так, в 1690 г. Якоб Бернулли решил задачу об изохронной кривой, т. е. такой кривой, падая по которой тяжелое тело проходит по вертикали в равные времена равные расстояния. В том же году он поставил проблему цепной линии, связанную с технической задачей о морских цепях и канатах. Задача была решена в следующем году Лейбницем, Гюйгенсом и Иоганном Бернулли. Затем Якоб Бернулли распространил полученное решение на цепи и канаты с переменным весом единицы длины.

Дальнейшее изучение кривых привело к постановке Иоганном Бернулли в 1696 г. задачи о брахистохроне — кривой, по которой тяжелое тело покрывает расстояние между двумя точками в кратчайшее время. При решении этой проблемы, приводившей к циклоиде, Якоб Бернулли поставил ряд новых задач, из которых одна — об изопериметрической кривой — привела к созданию вариационного исчисления. Якоб Бернулли занимался также определением центра качания тел и изучал сопротивление движению в жидкости различных тел. Иоганн Бернулли продолжил решение проблемы удара тел, учение о «живой силе»; он дал определение понятию «работа» и сформулировал «принцип виртуальных скоростей». Он также изучил движение тел в сопротивляющейся среде и оспаривал у своего сына Даниила приоритет вывода основного уравнения гидродинамики. Ему же принадлежит знаменитый теорема о центроидах.

В 1688 г. математик Пьер Вариньон (1654—1722) представил Парижской академии наук доклад о проекте новой механики, в основу которой он положил закон параллелограмма сил; здесь же он изложил задачу о веревочном многоугольнике. 26 января 1717 г. Иоганн Бернулли написал ему письмо, в котором сформулировал принцип виртуальных работ и рекомендовал Вариньону воспользоваться им в своем исследовании; Вариньон не воспользовался этим советом.

¹ Маркс К., Энгельс Ф. Соч., т. 23, с. 384.

При организации Петербургской академии наук в числе первых ее членов были Николай I Бернулли и Даниил Бернулли. Петр I предполагал пригласить в качестве президента Академии Лейбница, но дело затянулось, и Петр смог подписать указ об основании Академии лишь 22 января 1724 г. — через 8 лет после смерти ученого. Первым президентом Академии, открывшейся в 1725 г., стал лейб-медик Л. Л. Блюментрост (1692—1755), уроженец Москвы.

Иоганн Бернулли не вошел в состав Академии, но был избран ее почетным членом. В мае 1727 г. в Петербургскую академию был приглашен Эйлер. В числе первых академиков был еще один механик — Якоб Герман (1678—1735). Герман был известен своим трудом «Форонмия, или О силах и движениях твердых и жидких тел» (1715). Он занимался различными вопросами математики и механики, в частности изучал колебания маятника. Старший из Бернулли — Николай — прожил в Петербурге лишь восемь месяцев и скончался летом 1726 г. Посмертно в первом томе «Комментариев Академии наук» за 1726 г. были опубликованы два его мемуара по теории удара тел и по теории дифференциальных уравнений. Даниил Бернулли пробыл в Петербурге до 1733 г., занимался он исследованиями в области гидродинамики. Труд его «Гидродинамика» был издан в Страсбурге в 1738 г. В нем все было новое, даже термин «гидродинамика» принадлежал автору. Рассуждения Бернулли исходят из принципа сохранения живых сил, пользуется он и экспериментом. Бернулли впервые установил различие между гидростатическим давлением и гидродинамическим; он вывел уравнение (носящее его имя), выражающее связь между давлением и скоростью идеальной тяжелой жидкости. Здесь же он обосновал закон Бойля — Мариотта, тем самым заложив основы кинетической теории газов.

Даниил Бернулли занимался также механикой упругого тела: он вывел дифференциальное уравнение поперечных колебаний призматического бруса и применил его в некоторых частных случаях. По его совету Эйлер занялся теорией поперечных колебаний бруса.

И Эйлер и Бернулли изучали в Базеле медицину, и оба интересовались задачами физиологии, пытались перевести их на язык математики. Так, Даниил Бернулли изучал течение крови по сосудам как гидродинамическую

задачу, а Эйлер применил математические методы к исследованию некоторых движений мускулов. Интерес к подобным исследованиям не был случайным: ятромеханика была в XVIII в. философски обоснована и даже доведена «до крайности». Интерес Эйлера к проблемам физиологии был связан также с тем, что вначале его пригласили в Петербург на кафедру физиологии. Но уже в 1730 г. он получил кафедру физики, а в 1733 г. — кафедру математики и звание академика. В 1741 г. он переехал в Берлин, но связей с Петербургом не порывал и значительную часть трудов продолжал печатать в журналах Петербургской академии. В 1766 г. Эйлер возвратился в Петербург, где 18 сентября 1783 г., как было сказано его современником, «прекратил вычислять и жить».

Эйлер был чрезвычайно разносторонним ученым. Он занимался проблемами математики и механики в самом широком диапазоне, многое сделал в математической физике, баллистике, кораблестроении, кораблевождении, астрономии и небесной механике, оптической технике, теории машин, теории турбин, картографии и в других направлениях науки и техники. Особенно многим ему обязана механика, к проблемам которой он всегда подходил как математик. Сама механика в то время была неотделима от математики и математика развивалась тогда в значительной степени для механики и из-за механики: это отразилось и на творчестве Эйлера.

Первым трактатом, в котором была построена система механики, явилась эйлерова «Механика, или Наука о движении, изложенная аналитически» (1736). Исходя из положений Ньютона и Гюйгенса, Эйлер развивает динамику как рациональную науку. Трактат посвящен динамике точки. Эйлер вводит понятие мощности, или силы: его характеризует изменение в движении точки, происходящее под влиянием мощности (или силы). Направление силы совпадает с направлением прямой, по которой сила побуждает двигаться точку. При отсутствии силы точка сохраняет состояние покоя или прямолинейного равномерного движения. Инерцией Эйлер называет свойство, присущее всем телам и материальным точкам находиться в состоянии покоя или прямолинейного равномерного движения. Он различает абсолютные силы (например, силу тяжести), которые непрерывно действуют на тело вне зависимости от его состояния покоя или движения, и от-

носительные силы, действие которых зависит от скорости тела. В качестве примера относительной силы он приводит силу потока воды в реке, действие которой исчезает, если скорость движущегося тела сравняется со скоростью потока.

В качестве основных законов механики Эйлер принимает первый и второй законы Ньютона. Он не занимается вопросом, чем измеряется движение — количеством движения или живой силой, но вводит оба эти понятия, хотя в его терминологии, как, впрочем, и у всех ученых века, четкости еще нет. Второй закон механики Эйлер читает как «приращение скорости пропорционально импульсу силы», но одновременно развивает теорему о живой силе, не касаясь ее физического смысла. Ее он формулирует так: «Приращение квадрата скорости будет пропорционально произведению силы на пройденный элемент пути». В предисловии Эйлер указывает, что он впервые применил к механике анализ, «благодаря которому только и можно достигнуть ее полного понимания».

Следующий шаг в создании динамики сделал Д'Аламбер, трактат которого о динамике был опубликован в 1743 г. Жан Лерон Д'Аламбер (1717—1783) был одним из самых блестящих ученых XVIII в. Он изучал математику, право и медицину; за два мемуара, представленных в 1739 и 1740 гг., по вопросам движения твердого тела в жидкости и интегральному исчислению он был избран членом Парижской академии наук (в 1771 г.). В 1764 г. он был избран в Петербургскую академию наук.

Д'Аламбер утверждал, что механика строится на основе трех принципов: инерции, сложного движения и равновесия. Он считал, что следует учитывать лишь две причины изменения состояния тела: удар и силу притяжения.

Первая часть трактата Д'Аламбера посвящена статике, вторая — динамике системы со связями. Основным содержанием второй части является изложение «принципа Д'Аламбера» и способов его применения к решению задач механики. Позже, уже на исходе века, Лагранж, характеризуя «Трактат о динамике» Д'Аламбера, скажет: «...предложен прямой и общий метод, с помощью которого можно разрешить, или во всяком случае выразить в виде уравнений, все проблемы механики, какие только можно себе представить. Этот метод приводит все законы

движения тел к законам их равновесия и таким образом сводит динамику к статике...

Правда, этот принцип не дает непосредственных уравнений, необходимых для разрешения проблем динамики, но он показывает, каким образом эти уравнения могут быть выведены из условий равновесия. Таким образом, если этот принцип сочетать с обычными принципами равновесия рычага или сложения сил, то всегда можно найти уравнения каждой проблемы; однако трудность определения тех сил, которые должны уничтожаться, равно как и законов равновесия этих сил, делает зачастую применение этого принципа неудобным и утомительным, а решение, которое при этом получается, почти всегда сложнее тех решений, какие могут быть получены путем применения менее простых и менее прямых принципов, как в этом можно убедиться из второй части «Трактата динамики» Д'Аламбера»².

Несмотря на все свое значение, трактат Д'Аламбера не повлиял на ближайшее развитие методов механики в такой степени, в какой следовало бы: этому препятствовали не совсем ясный способ рассуждений автора, а также сложность терминологии. Так, под скоростью он понимает и скорость и ускорение, причем для ускорения пользуется, кроме того, термином «ускорительная сила», и у него это производное понятие, а не одно из исходных, как у Д. Бернулли и Эйлера.

Д'Аламбер был одним из самых влиятельных философов века. Вместе с Дени Дидро (1713—1784) он принял издание «Энциклопедии», многотомного труда, который должен был охватить всю совокупность знаний, а также проложить пути для новых наук. «Энциклопедия» начала выходить в 1751 г. До 1765 г. были изданы 17 томов, а в 1762—1772 гг. вышло 11 томов иллюстраций, в 1776—1777 гг. были изданы 4 тома дополнений и том иллюстраций, и, наконец, в 1780 г. вышел указатель в двух томах — таким образом, все издание составило 35 томов. В качестве авторов «Энциклопедии» выступали лучшие умы Франции; сам Д'Аламбер написал статьи, касающиеся математики, механики и других отделов точного естествознания, а также введение, в котором изложил свой проект систематизации наук. Его перу при-

² Лагранж Ж. Аналитическая механика, т. 1. М.—Л., 1950, с. 312.

надлежали и статьи общего содержания. Так, в статье «Коллеж» он выступает против системы образования, развитой иезуитами, и предлагает новый план обучения, свободный от мертвящей схоластики; в статье «Коперник» описывает борьбу инквизиции с гелиоцентрическим учением; в статье «Школа» борется с пережитками схоластики. В большой статье «Экспериментальный» он анализирует сущность эксперимента и определяет его значение для развития науки. Физика, утверждает Д'Аламбер, имеет задачей математическую формулировку законов, управляющих явлениями природы, а не поиски каких-то конечных причин. Вместо того чтобы, подобно Декарту, пояснять все с помощью априорных дедукций, ученый должен, следуя Бэкону, испытывать природу путем наблюдения и эксперимента.

Значительное место в иллюстрациях «Энциклопедии» занимают изображения машин, хотя это еще не те машины, которые вызвали промышленный переворот. Интерес к машинам в XVIII в. повсеместный; описания машин печатает Парижская академия, необходимость ознакомления с машинами записывается в уставе Королевского общества. В середине века теорией машин, а иногда и практикой начинает интересоваться Эйлер. Он исследует работу гидравлических двигателей, работает над теорией зубчатых зацеплений, пытается доказать принципиальную неверность исследования машин с помощью статики и предлагает план их изучения в движении.

Однако подавляющее большинство работ того времени «по части машин» лишь описывает их, приводя в качестве теории несложные расчеты их равновесия под действием сил и рабочей нагрузки. Самым большим сочинением, посвященным машинам, которым пользовались на протяжении всего столетия, вплоть до второго десятилетия XIX в., был «Театр машин» саксонского инженера и ученого Якоба Лейпольда (1674—1727). При его жизни с 1725 г. вышло шесть томов. Посмертно, в обработке других ученых, вышли тома восьмой (1739) и девятый в трех книгах (1735—1788); в последней четверти века было выпущено второе издание этого колоссального труда.

Характерной особенностью и труда Лейпольда, и других, меньших по размерам подобных книг является их

практическая направленность. В них нет теории, ибо никакой технической теории еще не существует, прикладных наук еще нет, а для практиков пока нужны книги с описаниями машин и процессов и с очень несложными расчетами. Но основы прикладного знания уже заложены, его сумма к концу века возрастает, и в течение века есть уже попытки теоретиков решить некоторые инженерные задачи, против чего практики возражают (считая математику наукой нужной, но совершенно неприменимой ни к строительству, ни к устройству машин).

На протяжении всего XVIII в. никто не готовил ни механиков, ни технологов. Мельницы, машины и различные технологические установки строили практики-механики, профессия которых зачастую была наследственной. Как позже писал Фейрберн³, такой механик был иногда единственным представителем механических искусств и наивысшим авторитетом во всем, что касалось применения воды и ветра в качестве источников энергии для мануфактур. В своей округе он был механиком-универсалом и к тому же умел работать на токарном станке, знал слесарное, кузнечное и столярное дело. Он ремонтировал и исправлял установки, соорудил новые и запускать их, ходил от одного пункта до другого, ибо нередко был единственным в своей округе. Таким образом, механик XVIII в. был чем-то вроде бродячего инженера и ремонтера в одном лице. Он хорошо знал арифметику, кое-что из геометрии, умел измерять, работал с уровнем и иногда имел достаточно глубокие познания в практической математике. Он мог рассчитать скорость, определить мощность и нагрузку машины, составить чертеж, мог построить здание, колеса и плотины, провести канал, соорудить мост. Все это умел делать английский millwright и западноевропейский практик-механик; на Руси такой мастер на все руки назывался розмыслом.

Небольшие познания в математике имели и архитектор-практик, и военный инженер, и горный мастер начала века.

Но инженеров требовалось все больше, и с самого начала века в разных странах Европы возникают технические школы, сперва военно-инженерные, артиллерийские, морские и горные, затем — путевые. Россия одной

³ См.: Fairbairn W. Treatise on mills and mill-work. London, 1861.

из первых пришла к необходимости создания технических школ: Петр I заставлял изучать инженерное дело не только в Навигацкой и Инженерной школах и в Морской академии, но и в духовных училищах.

Преподавание механики в университетах и в технических школах было принципиально различным. В университетах читался курс «прикладной», или «смешанной», математики, в состав которого, наряду с элементами статики входили также некоторые сведения из оптики, гониометрии, космографии, фортификации, архитектуры, артиллерии и еще десятка наук. Для специальных школ это не годилось, поэтому начиная с 60-х годов XVIII в. появляются учебники, в которых, помимо статики, все в большем объеме даются элементы динамики.

Так, в 1764 г. в Петербурге вышел из печати учебник механики Я. П. Козельского (1728—1793 ?). Автор указывает, что механика — это учение о равновесии и движении тел. Он не выделяет статику в отдельный раздел; на протяжении всего курса стремится показать естественнонаучную сущность науки. «Что принадлежит до метода или порядка в расположении... — пишет он, — то в том не следовал я другим авторам не от тщеславия, а от подражания лучшему. Они пишут механические правила наподобие математических, кои выводятся из положений и рассуждений; напротив того, в механике как физической науке такой порядок расположения предложений показался мне непристойным, для того что самому мне нередко случались некоторые механические правила весьма трудны, хотя я и мог разуместь их доказательства; а сему причиною не иное что было, как только то, что я об истине тех предложений несколько сомневался, не видев руководствующих к тому опытов, чего ради я в описании правил сей науки за благо рассудил приноровлять математические правила к законам природы, нежели склонять ее в согласие математическим правилам; и таким образом, приняв к тому за предводителя природу, сперва полагаю всякому действию ее опыт, дабы приуготовить чрез то начинающегося учиться к скорейшему понятию тех предложений... которые выводятся и должны выводиться в механике из опытов»⁴.

⁴ Козельский Я. П. Механические предложения для употребления обучающегося при Артиллерийском и инженерном шляхетском кадетском корпусе благородного юношества. СПб., 1764, с. 1.

Подобные книги появляются и в других странах. Во Франции учебник механики издал в 1764 г. известный астроном Н. Л. Лакайль, в 1774 г. вышел «Трактат по механике» Ж. Ф. Мари. Эти учебники включают наравне со статикой и динамику. Авторы обычно следуют Эйлеру и Д'Аламберу, стараясь примирить некоторые терминологические расхождения.

Выделение и специализация инженерных профессий и возникновение технического образования повлекло за собой окончательное разделение искусств. В середине века появляется понятие «изящные искусства», к которым относят изобразительные искусства, театр, музыку и архитектуру, и «механические искусства», которые становятся синонимом техники. Тем самым были разорваны глубокие связи, существовавшие между искусством и математикой и механикой.

Однако «изящные искусства» и механика постоянно находят общие задачи и совместно ищут их решения. Ярким примером может служить памятник Петру I в Петербурге — «Медный всадник», над которым Э. М. Фальконе работал вместе со своей ученицей М. А. Колло с 1766 по 1778 г. Наравне с гидросооружениями Марли и Змеиногорска это одно из лучших решений прикладной механики столетия. Уже транспортировка камня для пьедестала составила сложнейшую задачу для техники того времени (при этом были использованы чугунные шары, подкладываемые под камень, — прообраз будущих шарикоподшипников). Памятник является художественным изображением движения: здесь все в порыве — и вздыбленный конь, и фигура всадника. Фигура коня поставлена на три точки, в пространство между которыми проектируется центр тяжести композиции, что на первый взгляд не очевидно, так как передняя половина ее вся оказывается на весу.

Наряду со становлением механики на протяжении века происходит интенсивная изобретательская деятельность, которая многое дала практической механике и в дальнейшем послужила основой для быстрого развития прикладной механики в различных ее ответвлениях. В Англии, Франции, России, Германии появляются новые станки и технологические машины. Ведется интенсивная работа по созданию универсального двигателя. В 1712 г. атмосферную машину для откачки воды из шахт создал

английский кузнец Томас Ньюкомен (1663—1729), решив таким образом задачу преобразования энергии пара в механическую работу. В 1722 г. машины Ньюкомена были установлены в Кесселе, Вене и Хемнитце. Первая машина Ньюкомена попала в Россию в самом конце века: ее приобрели для Кронштадтского порта, хотя в самой России в то же время пошла на слом значительно лучшая машина Ползунова.

С большой одержимостью работали и над изобретением вечного двигателя, хотя невозможность его доказал еще Леонардо да Винчи. В 1717 г. Петр I чуть было не купил у изобретателя Орфиреуса его «вечный двигатель», о котором, впрочем, дал благоприятный отзыв в письме к Ньютоу видный лейденский физик с'Гравезанд. Изобретатели засыпали академии наук проектами вечных двигателей, и в 1755 г. Парижская академия решила отказаться от дальнейшего рассмотрения подобных заявок. Поиски вечного двигателя, с одной стороны, и идеи ятромеханики — с другой, стимулировали изобретательскую работу над автоматами. Сначала это лишь механические игрушки, но к концу века идеи их приводят к важным результатам. Так, замечательный французский механик Ж. Вокансон (1709—1782) изобрел несколько остроумных автоматов, имитировавших движения человека и животных. Он же в 1745 г. создал механический ткацкий станок.

В России были разработаны различные модели металлообрабатывающих станков, на Тульском заводе создана первая в мире система взаимозаменяемых деталей в производстве мушкетов. В 1765 г. И. И. Ползунов (1728—1765) на Колывано-Воскресенских заводах на Алтае построил первую в мире паровую машину — универсальный двигатель; она была запущена в работу 7 августа 1766 г. В 80-х годах на Змеиногорском руднике на Алтае бергмейстер К. Д. Фролов (1726—1800) создал уникальную гидросиловую установку, приводившую в движение целую систему горных машин. Много машин, приспособлений и приборов построил выдающийся механик И. П. Кулибин (1735—1818). В 1776 г. он разработал проект однопролетного арочного деревянного моста через Неву. Модель моста была испытана в присутствии Эйлера и получила его одобрение.

С развитием торговли и ростом городов непрерывно

увеличивалась роль дорог и водных путей сообщения. Их устройство ставило перед механикой много вопросов.

В середине XVIII в. в Испании велись работы по сооружению Кастильского канала. Тогда же в Англии был прорыт первый судоходный канал. В России строительство каналов было начато при Петре I: для снабжения Петербурга около 1711 г. были прорыты два канала: Мидожский (длиной 104 версты), соединивший Волхов и Неву, и Вышневолоцкий, соединивший реки Тверцу и Мсту. Впоследствии были созданы Тихвинская система, связавшая реки Самину и Тихвинку, и Мариинская, соединившая Ковжу и Вытегру. Так появилась возможность попасть водным путем из Каспийского моря в Балтийское, а из столицы — непосредственно в центральные губернии страны. Наиболее важная часть всей системы каналов, Вышневолоцкая, была усовершенствована известным русским гидротехником М. И. Сердюковым (1677—1754), который в течение 1720—1740 гг. построил целый комплекс гидротехнических сооружений и обеспечил бесперебойное движение судов.

Тем временем исследования в механике захватывали все новые области. Еще в 1662 г. П. Ферма (1601—1665) применил к решению одной задачи оптики принцип кратчайшего времени. В 1744 г. подобный принцип в механике разработал французский астроном П. Мопертюи (1698—1759). В соответствии с этим принципом при всяком изменении в природе количество движения, потребное для этого изменения, является наименьшим возможным. В том же году Эйлер нашел для этого закона математическую формулировку (в работе «Метод нахождения кривых линий, обладающих свойством максимума или минимума, или Решение изопериметрической задачи»). Здесь же он исследовал форму кривых, которые принимает гибкий стержень при различных условиях нагрузки. Эту задачу он решил с помощью разработанного им вариационного исчисления. Затем он рассмотрел задачу о поперечных колебаниях стержня.

В 1757 г. Эйлер опубликовал работу «О силе колонн», в которой изучил задачу продольного изгиба колонн и вывел формулу для определения критической нагрузки (носящую его имя). В 1760 г. вышла в свет «Теория движения твердых тел» Эйлера. Здесь он возвращается к понятиям покоя и движения, которое рассматривает

как изменение положения тела или точки в пространстве. Твердым телом он считает такое, в котором расстояние между элементами остаются постоянными. В каждом теле он определяет центр масс, или центр инерции, причем указывает, что понятие центра тяжести является более узким, так как обуславливается лишь тяготением. Определяет также момент инерции тела и изучает движение тела вокруг закрепленной оси, а затем движение свободного твердого тела. Это движение он разлагает на движение центра инерции тела и на движение вокруг центра инерции и выводит систему уравнений, описывающих его.

В 1766 г. Эйлер возвратился в Россию и, несмотря на ухудшение зрения, а затем полную слепоту, продолжал интенсивно работать; свои сочинения он диктовал сыну и ученикам. С 1766 по 1783 г. он написал или, скорее, продиктовал более 400 работ, которые продолжали публиковаться в трудах Петербургской академии наук еще много лет после его смерти. Полностью они не изданы и до сего времени. Всего Эйлер написал более 800 работ, не считая писем, многие из которых представляют значительную научную ценность.

О сопротивлении среды движению тел было известно давно: «практической оценкой» этого явления была форма судов, а еще раньше — стрел. Однако к научному пояснению известных фактов пришли относительно поздно. Одним из первых, кто обратил внимание на сопротивление воздуха, был Тарталья. Г. Амонтон (1663—1705) пришел к заключению, что трение между твердыми телами зависит лишь от относительного давления. В 1704 г. Паран (1666—1716) установил понятие угла трения, который он назвал углом равновесия, а тангенс этого угла — коэффициентом трения. Мусхенбрук (1692—1761) заметил, что на величину силы трения влияет также и поверхность соприкосновения, а в 1722 г. М. Камю нашел, что трение движения меньше, чем трение покоя. Трение изучали также Лейпольд, Белидор, Эйлер. Последний установил, что коэффициент трения является числом, близким к $\frac{1}{3}$.

Поиски величины силы сопротивления среды начались позже, с середины XVIII в. Французский ученый Ж. Ш. Борда (1733—1799) в 1762 и 1765 гг. вывел, что сопротивление жидкости движущимся в ней телам про-

порционально приблизительно квадрату скорости. Изучая явление удара, он разработал также теорию разрывных снарядов с учетом сопротивления воздуха.

В 1775 г. комиссия Парижской академии наук в составе Д'Аламбера, Кондорсе и Боссю получила распоряжение выяснить условия улучшения внутренней навигации. Для этого Ш. Боссю (1730—1814) провел серию экспериментов над моделями судов в условиях практически неограниченной жидкости и пришел к заключению, что сопротивление пропорционально квадрату скорости движения, а в некоторых случаях и более высокой степени скорости. Он установил также, что сопротивление тел, полностью погруженных в воду, несколько меньше, чем тех, которые погружены лишь частично.

В последней четверти века изучением трения занялся Шарль Кулон (1736—1806). В 1781 г. он опубликовал «Теорию простых машин с точки зрения трения их частей...», в которой развил теорию трения и вывел законы, носящие его имя.

Создание теории машин связано с именами Монжа и его ученика Карно. Гаспар Монж (1746—1818) учился на кондукторском отделении Мезьерской военно-инженерной школы (как сын мелкого торговца он не мог быть принят на основное отделение). Однако «низкое» происхождение не помешало ему в возрасте 22 лет стать профессором той же школы. Монж развил начертательную геометрию и создал техническое черчение. Он явился инициатором преподавания курса «Построение машин» и наметил основания классификации механизмов.

Лазар Карно (1753—1823) также окончил Мезьерскую военно-инженерную школу. В 1783 г. он опубликовал «Опыт о машинах вообще», в 1803 г. книга была переиздана под названием «Основные принципы равновесия и движения». Карно считает, что механика по своей сущности является наукой экспериментальной, тем самым подтверждая ее право на самостоятельное существование, вне границ математики. Систему свою он строит на основании изучения движений, отрицая возможность построения ее, исходя из «метафизического и темного понятия силы». Фундаментальным законом механики он считает закон количества движения. Понятием силы пользуется, он лишь как вторичным. Он различает ускоряющую силу (т. е. ускорение), движущую силу, силу давления, или

мертвую силу, живую силу, скрытую живую силу (потенциальную энергию). Вводит понятие силы инерции, определяемой им как «сопротивление, противопоставляемое телом любому изменению его состояния». При этом указывает, что если сама «инерция является лишь свойством, которое не поддается измерению, то сила инерции является настоящей измеряемой величиной: это то количество движения, которое тело передает иному телу, изменяющему его состояние движения».

Карно пытается построить систему механики. Но его механика — это скорее механика машин, и он прекрасно понимает, что машины следует изучать в состоянии движения. Поэтому все законы и теоремы механики он рассматривает применительно к машинам, его книгу уже можно отнести к прикладной механике.

Механику XVIII в. завершил Лагранж. Его классическая работа «Аналитическая механика» вышла в Париже в 1788 г. В предисловии он писал: «Существует много трактатов о механике, но план настоящего трактата является совершенно новым. Я поставил себе целью свести теорию механики и методы решения связанных с нею задач к общим формулам, простое развитие которых дает все уравнения, необходимые для решения каждой задачи. Надеюсь, что способ, каким я постарался этого достичь, не оставит желать чего-либо лучшего»⁵. Как видим, Лагранж считал, что своей работой он завершил развитие механики. Основная его идея — сделать механику частью анализа, мысль, как мы видели, противоположная идеям Карно. Лагранж не принимал также во внимание те прикладные направления механики, которые в XVIII в. уже начали оформляться в самостоятельные отрасли. Его трактат состоит из трех частей: статики, динамики и гидродинамики; каждой из них он предпосылает очень подробные исторические экскурсы.

Понятие силы у Лагранжа определяется движением. Сила — это любая причина, которая сообщает или стремится сообщить движение телам. Поэтому она оценивается количеством вызываемого ею движения. До конца он не выяснил этого понятия, как и некоторых других, в частности кинематических, хотя свою статику строил, исходя из принципа виртуальных скоростей и, следова-

тельно, должен был бы определить исходное понятие — скорость. Но он лишь указывает, что скорость неравномерных движений измеряется отношением дифференциала пути к дифференциалу времени. Ускорительная сила у Лагранжа — ускорение, умноженное на единичную массу.

Динамика Лагранжа основана на законе, который носит название уравнения Д'Аламбера — Лагранжа. Из этого уравнения он выводит закон движения центра тяжести системы, закон моментов количества движения, закон живой силы. Из него же он выводит принцип наименьшего действия и показывает, как из последнего можно было бы получить исходное уравнение. Далее он выводит уравнения, получившие название уравнений Лагранжа первого и второго рода.

Лагранж не завершил механику и не сделал ее полного свода: еще при его жизни начали формироваться новые направления: теория упругости, механика материалов, механика машин. В 1799—1800 гг. П. С. Лаплас (1749—1827) опубликовал два первых тома «Небесной механики». И, самое существенное, в начале XIX в. начали весьма интенсивно развиваться именно те направления механики, которые основывались на экспериментальных законах и пользовались экспериментальными методами исследования.

Эксперимент в XVIII в. характеризовал не только науку; в равной степени он был свойствен технике, собственно технике промышленного переворота. Новые машины, заменившие руку человека, явились результатом глубокого и длительного экспериментирования; ведь одновременно с машинами создавались и новые технологические процессы, и первый «задел» в прикладных и технических науках создали именно те практики-изобретатели, которые сумели перевести сущность выполняемых человеком операций на язык машин.

Так же было и с паровой машиной. Джеймс Уатт (1736—1819) добился положительного результата после большой серии экспериментов. При этом ему пришлось создать несколько совершенно новых узлов: во-первых, он отделил конденсатор от машины и ввел распределительный механизм; затем изобрел несколько механизмов для преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращательное движение вала. Самым простым

⁵ Лагранж Ж. Аналитическая механика, т. 1, с. 9.

было бы применить кривошипно-ползунный механизм, но он был запатентован. Поэтому Уатт предложил для этой цели иные механизмы; самыми интересными и важными оказались планетарный механизм и так называемый параллелограмм Уатта (Уатт считал его своим лучшим изобретением).

Производство паровых машин в конце XVIII в. стало государственным секретом Англии и вывоз их был запрещен. Несмотря на это, некоторые машины английского производства попали в другие страны. Кроме того, в результате усилий отечественных изобретателей паровые машины начинают строить во Франции, России, Германии, США и в других странах; правда, здесь их пока единицы, тогда как в Англии за последнюю четверть века было построено 193 машины общей мощностью 3215 л. с.

В США наука организовывалась в XVIII в. по европейскому образцу. В 1743 г. было создано Американское философское общество, в 1780 г. — Американская академия искусств и наук в Бостоне, одна из двух важнейших американских научных институций⁶.

Одним из первых виднейших американских изобретателей-механиков был Оливер Ивэнс (1756—1819). Сын фермера и внук мельника, он был таким же бродячим техником-механиком, как и его коллеги в Европе. И первое его изобретение относилось к мельницам, однако это была автоматическая мельница. Если в обычной мельнице вода или ветер приводили во вращение лишь жернов, а все прочие операции выполнялись вручную, то Ивэнс поставил конвейеры на все операции и создал таким образом непрерывный автоматический процесс. В то же время другой изобретатель, Эли Уитни, повторил изобретение взаимозаменяемости деталей (сделанное на Тульском заводе). Эти два изобретения позже оказали важное влияние на становление машиностроения в США.

Ивэнс, кроме того, сконструировал паровую машину высокого давления (10 ат), построил первый в США локомобиль и изобрел прямолю («прямолю Ивэнса»). Это была первая после Уатта попытка найти механизм, преобразующий поступательное движение во вращательное.

В России, после открытия в Москве по инициативе

⁶ Национальная академия наук в Вашингтоне была основана в 1863 г.

М. В. Ломоносова университета в 1755 г., механика к концу века проникает и в университетское преподавание. Появляются новые учебники механики и различные руководства. Примечательно, что научный уровень даже тех руководств, которые адресованы практикам, оказывается довольно высоким. Так, в 1791 г. в Петербурге переводчиком Адмиралтейской коллегии А. В. Колмаковым была опубликована «Карманная книжка для вычисления количества воды, вытекающей через трубы, отверстия или по желобам; также и силы, какою они ударяют, стремясь с данною скоростью; с приложением правил для вычисления трений, производимых в машинах, в пользу находящихся при строении мельниц и проведении вод» — одна из первых русских книг по прикладной механике. Автор называет «жидким телом то, которого поверхность по отытии внешних сил горизонтальна и которой гладкость самая малейшая сила нарушения; о последнем говорит следующее: «Вода, а под водою и все жидкое разуместь должно, давит стороны сосуда по направлению, параллельному к горизонту. Давление дна от поверхности воды до самого дна сосуда растет в арифметической прогрессии...»

Содержание книги достаточно широко охватывает сведения, необходимые при устройстве водяных мельниц. Читая ее, видишь, что практик начинает уступать свои позиции обученному технику. В книге довольно много расчетов, приводятся графики. Использование ньютоновской терминологии показывает источник, которым пользовался автор. Но не это важно, а то, что даже к старой технике подходят уже с новыми мерками: время практической механики прошло, и наступала эра прикладной науки.

ОТ ТЕХНИКИ К НАУКЕ

Промышленный переворот преобразовал к началу XIX в. английское мануфактурное производство в капиталистическое машинное. Паровая машина, универсальный двигатель, дала возможность устраивать промышленные

предприятия уже не только на берегах рек, как это было при господстве водяного колеса. С конца XVIII в. началось производство машин при помощи машин. Однако такая перестройка всего народного хозяйства проходила в Англии не легко. Война с Францией, длившаяся более двух десятилетий, вызвала большие экономические затруднения и тяжело отразилась на положении пролетариата. Крайне тяжелая работа, ужасающие жизненные условия, постоянная угроза безработицы — вот что получил английский рабочий в результате промышленного переворота. Но гнев трудящихся сперва обратился не по адресу: со второй половины XVIII в. начинается движение луддитов, разрушающих машины. Лишь в 20-х годах XIX в. это движение пошло на спад и с ростом сознательности рабочего класса потепленно прекратилось.

На протяжении XVIII в. значительную долю в создание механики внесли французские ученые, а доля англичан после Ньютона и Гука была невелика. Получается парадоксальное явление: в Англии, стране самой передовой техники, и притом механической техники, сильно отстает механика. Как будто все силы направлены на создание машин, а науке ничего уже не достается. Развитие машинного производства и наличие универсального двигателя стимулируют становление механического транспорта: появляются локомотивы, по рекам и морям, начинают ходить «пироскафы» (пароходы). Англия и здесь оказалась впереди и в начале века «представлялась французам страной 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 Ньюкасла, около Лидса: паровые машины везут уголь! Сами по себе везут, без помощи четвероногих!»¹

Все же промышленный переворот, поднявший Англию на новую, более высокую ступень экономического развития по сравнению с континентальной Европой, не мог

¹ *Тарле Е. В.* Рабочий класс в Англии в первые времена машинного производства (1815—1838). М., 1928, с. 219.

не повлиять и на английскую науку. Быстро развивающаяся машинная промышленность требовала ответа на возникающие вопросы и не могла долго ждать. Поэтому с самого начала XIX в. английская наука приобретает практический характер: запросы промышленности стимулируют появление и становление новых наук, «технических», основанных на наблюдении и опыте и уже во вторую очередь пользующихся расчетно-математическими методами. Что касается старых наук, то в основном развиваются их прикладные направления, более интересные для сегодняшнего дня техники и производства. Очевидно, именно в связи с этим в Англии до середины века не открываются технические школы — пользуются старыми, традиционными методами ученичества.

Существенный вклад в механику упругого тела сделал Томас Юнг (1775—1829). По складу ума это был скорее человек XVIII в., чем XIX, но по характеру своей деятельности полностью принадлежал последнему. Он был врачом и физиком, работал в области механики, химии, физиологии, занимался расшифровкой египетских иероглифов, провел интересные исследования по волновой теории света. В 1794 г. в возрасте 21 года он был принят в члены Королевского общества. Юнг много путешествовал, получил несколько докторских степеней, некоторое время был профессором физики, но в основном работал в качестве практического врача. В 1807 г. он опубликовал в Лондоне «Курс лекций по натурфилософии и по механическим искусствам», в котором изложил сведения из самых различных областей знания. Во втором томе этого энциклопедического курса содержится определение модуля, позже названного модулем Юнга и ставшего важнейшим понятием новой отрасли механики — теории упругости. Юнг указал также, что срез является одной из упругих деформаций, и сформулировал понятие нейтральной линии при изгибе. Развитие теории упругости явилось делом ряда ученых, среди которых выдающуюся роль сыграли французы Навье, Коши и Сен-Венан.

Как мы видели, развитие механики на рубеже XVIII—XIX вв. в значительной степени было связано с исследованиями ученых круга Политехнической школы. Один из ее организаторов Пьер Симон Лаплас создал небесную механику как новое направление науки: он

завершил объяснение движения тел Солнечной системы на основе закона всемирного тяготения, в результате чего развил свою знаменитую космогоническую гипотезу. Лаплас сформулировал задачу о трех телах, изучил движения небесных тел, в частности Луны, и разработал теорию приливов и отливов, что явилось существенным вкладом в гидродинамику.

«Небесная механика» Лапласа (пять томов, 1798—1825 гг.) открывается разделом «Об общих законах равновесия и движения», в котором излагаются положения и законы, на которых строится механика: общие уравнения равновесия и движения системы материальных точек, твердого тела и идеальной жидкости, законы движения центра масс, живой силы и площадей. Движение Лаплас относит к неограниченному пространству, неподвижному и пронизываемому для материи, силу определяет как причину перемещения тела из одного места в другое.

Для механики Лапласа существенно то, что он рассматривает ее как физическую науку, — в этом его принципиальное расхождение с Лагранжем. Более того, он считает необходимым включить в механику всю математическую физику. Он был одним из основоположников молекулярной механики — механики, основанной на молекулярной теории строения вещества (в первой половине XIX в. понятия молекулы и атома считались тождественными). Молекулярным притяжением тогда объясняли химическое сродство, явление упругости, капиллярность и иные физические явления, не поясняемые теорией всемирного тяготения.

Физическую сущность механики подчеркивали и другие французские ученые: Пуансо, Пуассон, Навье. Эта существенная особенность французской механики первой четверти столетия была обусловлена связью с Политехнической школой, с запросами инженерного дела, которое как раз в это время начало создавать собственные научные направления, и в первую очередь прикладную механику. Воспитанник Политехнической школы Луи Пуансо (1777—1859) ввел в механику понятие «пара сил» — двух равных сил противоположного направления, приложенных к разным точкам плоскости. Он показал, что величина пары сил измеряется произведением силы на кратчайшее расстояние между направлениями сил.

Понятие пары сил явилось важнейшим в статике Пуансо, с его помощью он вывел теорему о том, что любое число сил, действующих на твердое тело, можно привести к силе и к паре. Пуансо разработал теорию вращения тел, установил один из случаев вращения гироскопа, создал понятие эллипсоида инерции.

Механика Пуансо была физической в еще большей степени, чем механика Лапласа, и в значительной мере явилась основой для разработки прикладной механики. В том же направлении работал и ученик Лапласа — Симеон Дени Пуассон (1781—1840). В своем «Учебнике механики», первое издание которого вышло в 1811 г., он изложил механику как физическую науку и привел много ее применений к различным задачам физики, астрономии и артиллерии. В частности, он решает задачи полета снаряда и отдачи орудия. Подобно Лапласу, Пуассон был одним из самых ярких теоретиков молекулярной механики, занимался он также небесной механикой, теорией упругости и гидродинамикой.

Воспитанник Политехнической школы Луи Мари Апри Навье (1785—1836) по ее окончании изучал в Школе мостов и дорог строительное искусство. Затем работал инженером, но одновременно начал исследовать ряд вопросов практической механики. В 1813—1819 гг. он переиздал «Гидравлическую архитектуру» Белидора, значительно дополнив ее, в частности предложил первый расчет махового колеса.

В 1819 г. Навье начал читать в Школе мостов и дорог лекции по сопротивлению материалов; этот курс был издан в 1826 г. Здесь он указал, что для полного описания механических свойств материалов нужно знать не только величину предела прочности, но и модуль упругости. Поскольку формулировка Юнга была неясной, Навье дал свое определение модуля, принятое и в настоящее время: «Модуль упругости равен отношению нагрузки, приходящейся на единицу площади поперечного сечения, к произведенному ею относительному удлинению». Вклад Навье в создание теории упругости и сопротивления материалов очень существен: он развил теорию изгиба балки, предложил общий метод решения статически неопределимых задач, вывел дифференциальные уравнения равновесия упругого изотропного тела. Используя метод Д'Аламбера, вывел общие уравнения

движения упругого тела. Его работы заложили основы строительной механики.

Иначе происходило становление механики машин: формально она возникла из раздела курса начертательной геометрии, который читал в Политехнической школе сотрудник Монжа — Жан Никола Ашетт (1769—1834). «Элементарный курс машин» (1811) Ашетта содержал принципы построения машин, некоторые сведения по теории зубчатых зацеплений и кулачковых механизмов и описание машин, применяемых на строительных работах. Он соответствовал программе Монжа и включал классификацию составных частей машин, которые Монж назвал элементарными машинами. Тремя годами раньше, в 1808 г., Политехническая школа опубликовала в качестве своего учебника «Курс построения машин», написанный двумя испанцами: инженером А. А. Бетанкуром и математиком Х.-М. Ланцем. Содержание ее сводилось к классификации «элементарных машин» и их описанию. Это была первая работа по технической кинематике, так как ее темой было воспроизведение различных преобразований движения при помощи различных механических способов. Появление новой науки отвечало потребностям возникающего машиностроения: его дальнейшее развитие нуждалось в выработке научного подхода к изучению и проектированию машин.

Один из авторов курса — Августин Бетанкур (1758—1824) в 1808 г. приехал в Россию. Здесь он принял участие в реорганизации службы путей сообщения, построил ряд заводов и зданий (в частности, по его проектам был построен Манеж в Москве и заложен фундамент Исаакиевского собора), руководил застройкой Петербурга, в Нижнем Новгороде построил ансамбль ярмарочных зданий, с 1818 г. был генеральным директором путей сообщения. Он был одним из учредителей и руководителей первого в России высшего учебного заведения нового типа — Петербургского института путей сообщения, открытого в 1809 г.

В XIX в. промышленный переворот с некоторым опозданием против Англии происходит в странах Западной Европы и в США. В России он начался в первых годах века, но развивался крайне медленно: мешала полуфеодалная структура общественных отношений. Крестьяне, составлявшие подавляющее большинство на-

селения страны, не имели личной свободы, и это задерживало возникновение резервной армии труда. Все же машины с самого начала века проникают и в русскую промышленность.

В начале второго десятилетия века появились первые локомотивы. В 1814 г. Джеймс Стефенсон (1781—1848) построил свой первый паровоз. Уже в 1825 г. завод Стефенсона в Ньюкасле начал «массовый» выпуск паровозов, и в 1830 г. была открыта первая в мире железная дорога для пассажирского сообщения — Манчестер — Ливерпуль. Началась эра железнодорожного строительства. Металлургия получает заказы на производство рельсов, и вопросы прочности становятся объектом научных исследований.

Первая работа по теории упругости была представлена Навье в Парижскую академию наук в 1821 г. Этой работой заинтересовался математик Коши, который и сам предпринял исследования в том же направлении. Огюстен Коши (1789—1857) прошел тот же путь, что и Навье: окончил Политехническую школу и Школу мостов и дорог, а затем служил инженером в Шербурском порту. Но его увлекала математика, и с 1813 г. он переходит на преподавательскую работу в Политехнической школе и Сорбонне. Коши принадлежит большой вклад в развитие и математики и механики.

Навье при выводе своих уравнений рассматривал силы, действующие между молекулами тела; Коши ввел в теорию упругости понятие напряжения и показал, что в упругом теле давление не является нормальным относительно плоскости действия. Он ввел понятие главного напряжения, установил соотношения между шестью компонентами напряжения и шестью компонентами деформации для изотропного тела и показал, что для определения упругих свойств его требуется знание двух упругих постоянных.

Учеником Коши был Михаил Васильевич Остроградский (1801—1862). Он родился в Полтавской губернии, учился в Харьковском университете, но курса не окончил — был обвинен в вольнодумстве. Поэтому с 1822 по 1828 г. он учился, а затем преподавал в Париже. По возвращении в Россию был избран в Академию наук и с того времени до конца своих дней был связан с Петербургской академией. Основные работы Остроградского от-

носились к математической физике. Он занимался теорией волн, теорией теплоты, изучал упругие колебания тел, вопросы равновесия и движения твердых тел, вековые неравенства в движении планет. Остроградский много занимался педагогической работой: преподавал в Морском корпусе, Главном педагогическом институте, Институте путей сообщения, осуществлял надзор за преподаванием математики в военных и строительно-путевых учебных заведениях. Свои курсы по математике и аналитической механике он читал на самом высоком научном уровне.

Прикладная механика также была очень высоко поставлена в петербургских высших школах. В определенной степени это было заслугой Бетанкура, который привлекал к преподаванию нескольких выдающихся механиков, выпускников Политехнической школы, и воспитал в Институте путей сообщения русских ученых-прикладников.

Из профессоров этого института важный вклад в механику внесли Габриэль Ламе (1795—1870) и Бенуа Поль Эмиль Клапейрон (1799—1864).

Ламе и Клапейрон опубликовали ряд работ по прикладной теории упругости. Они принимали участие в расчете конструкций Исаакиевского собора в Петербурге, в связи с чем изучали вопрос об устойчивости арок. Развивая исследования Копи в области теории напряжений, Ламе построил поверхность напряжений, названную эллипсоидом напряжений Ламе. В 1852 г. Ламе опубликовал «Лекции по математической теории упругости твердых тел» — первую книгу по теории упругости в мировой литературе.

В 1831 г. Ламе и Клапейрон возвратились во Францию и занялись вопросами техники сооружения железных дорог. Вскоре Ламе отошел от практической деятельности и начал преподавать в Политехнической школе, а затем в Сорбонне. Клапейрон занялся теорией проектирования железных дорог и локомотивов (в Школе мостов и дорог он читал курс паровых машин), интересовали его также математическая физика, термодинамика, важный вклад внес он в строительную механику.

Железнодорожное строительство развивалось быстро темпами: уже к началу 40-х годов в Англии было около 2,5 тыс. км железных дорог, в США — 5 тыс. и в

Западной Европе около 2 тыс. км. В России первый проект железной дороги был создан Бетанкуром. В 1837 г. была открыта первая железная дорога — Царскосельская, построенная чешским инженером Францишком Герстнером, а в 1843 г. началось строительство дороги Петербург — Москва. Автором проекта и руководителем строительства был Павел Петрович Мельников (1804—1880). Он окончил в 1825 г. Институт инженеров путей сообщения, а затем там преподавал: в 1833 г. был назначен профессором прикладной механики, позже занялся гидротехническим и железнодорожным строительством.

Появление локомотива — паровой машины на рельсах и изобретение американским инженером Робертом Фультоном (1765—1815) парохода, повлекшее за собой развитие речного и морского механического транспорта, обратило внимание ученых на вопросы динамики машин. Аварии локомотивов и паровых машин вызывались разными причинами: не были известны их динамика, поведение материалов, из которых они сооружались; недостаточно была разработана и техническая термодинамика. Поэтому железные дороги стали своего рода лабораторией, на базе которой создавались прикладные и технические науки, в том числе строительная механика, теория сооружений и в значительной степени динамика машин. В последнем направлении почти одновременно работали Понселе и Кориолис.

Гюстав Гаспар Кориолис (1792—1843) по окончании Политехнической школы и Школы мостов и дорог остался там преподавателем. В 1829 г. опубликовал работу «Вычисление действия машин», в которой поставил вопросы динамики машин. В предисловии он писал: «Когда книга уже была окончена, Понселе прислал мне литографированные лекции курса машин, прочитанного в Метце, чем отнял у меня право приоритета. Все же мне представляется, что было бы полезным собрать и представить в ином виде все рассуждения, относящиеся к такой важной науке, как теория машин». Кориолис обратил особенное внимание на терминологию, в частности обосновал понятие работы. Ему принадлежит также известная теорема о трех слагающих полного ускорения: относительной, переносной и добавочной.

Жан Виктор Понселе (1788—1867) по окончании Политехнической школы учился в Инженерной школе в

Метце. В июне 1812 г. он был направлен в действующую армию, в сражении под Красным попал в плен и в Саратове пробыл до июля 1814 г. Здесь он написал свой трактат о проективных свойствах фигур.

В июле 1814 г. Понселе вернулся во Францию. С этого времени начинается его интенсивная научная деятельность. Механикой ему пришлось заняться «в приказном порядке»: от начальника Инженерной школы он получил указание подготовить и прочесть курс индустриальной механики. Курс был прочитан в 1824 г. и стимулировал становление нового научного направления. Результатом его явилась стройная система динамики машин, основанная на глубоком изучении паровой машины. Одновременно с Кориолисом Понселе работал над уточнением понятия механической работы; сам он применил это понятие к вычислению действия машин. Пользовался он и принципом живых сил.

Как мы видели, английское машиностроение в первой половине XIX в. стояло значительно выше машиностроения стран континентальной Европы. В Англии же зародилась и техническая периодика: на рубеже веков, в 1797 г., там вышел первый номер «Журнала Никольсона», посвященного вопросам практических знаний; в 1798 г. — «Философский журнал», также посвященный техническим наукам.

В 1841 г. в Англии были опубликованы две книги по вопросам прикладной механики: «Механика инженерного дела» Уэвелла (1794—1866) и «Принципы механизмов» Роберта Виллиса (1800—1875). Уэвелл привел в систему практические вопросы механики; Виллис свое сочинение посвятил проблемам практической кинематики, в частности ввел понятие механизма как элементарной составляющей машины. Он внес также большой вклад в создание теории зубчатых зацеплений. Лекции Виллиса слушал Карл Маркс.

В те же годы профессор математики Кембриджского университета Чарльз Беббидж (1792—1871) трудился над созданием вычислительной машины. Однако задача, которую он поставил, не могла быть решена в то время: не было соответствующих технических условий. Машина Беббиджа предполагала программу — первым программистом стала женщина-математик, дочь Байрона, Ада Ловлейс (1815—1852).

Самым замечательным английским механиком первой половины века был Уильям Гамильтон (1805—1865). Его исследования в области механики были связаны с занятиями оптикой. Он решил создать оптику по образцу механики Лагранжа: «Кто размышлял о красоте и полезности общего метода Лагранжа, — писал Гамильтон, — должен почувствовать, что математическая оптика только тогда достигнет уровня, сопоставимого с математической механикой или с динамической астрономией, когда будет обладать соответствующим методом и станет воплощением одной центральной идеи»². Таким методом стал закон наименьшего действия Гамильтона. Его дальнейшая разработка привела к созданию метода интегрирования задач динамики Гамильтона — Якоби — Остроградского. В 1834 г. Гамильтон опубликовал работу «Об общем методе в динамике, посредством которого изучение движений всех свободных систем притягивающихся или отталкивающихся точек сводится к дифференцированию одного центрального соотношения или характеристической функции» (название длинновато, но строго соответствует содержанию работы), в следующем году — «Второй очерк об общем методе в динамике»; здесь он развил теорию канонических уравнений.

Дальнейшее развитие метода Гамильтона принадлежит Карлу Якоби (1804—1851). В «Лекциях по динамике», изданных посмертно в 1866 г., Якоби изложил метод Гамильтона и теорию канонических уравнений; сам он решил задачу для любых механических систем, обладающих силовой функцией. Одновременно с Якоби к тем же результатам пришел М. В. Остроградский.

В 1851 г. в Лондоне открылась первая Всемирная выставка, на которой были показаны машины, построенные в различных странах мира: это характеризовало прогресс мирового машиностроения. Этот прогресс отражал и достижения теоретических наук, в частности механики. Поскольку теория не могла еще ответить на многие вопросы практики, вслед за прикладными науками возникают технические, основанием для которых служат наблюдения и опыт. Их научная база неглубока: из разных соображений, иногда несовместимых между собой, строятся

² Hamilton W. R. The mathematical papers, v. 1. Cambridge, 1931, p. 315.

формулы со многими эмпирическими коэффициентами. Число этих наук непрерывно растет.

В 30-х годах века в связи с задачами строительства железных дорог начинается работа над созданием строительной механики и теории сооружений. В России важную работу в этом направлении выполнили воспитанники Института путей сообщения. Станислав Кербедз (1810—1899), профессор прикладной механики, спроектировал и построил первый в России металлический мост через Неву, имевший семь арок чугунных пролетов по 32—48 м длиной каждый, восьмой пролет был разводным. Мост был окончен в 1850 г. При его расчете впервые был применен кинематический метод. Герман Егорович Паукер (1822—1889) исследовал устойчивость сводов и пришел к соответствующим теоретическим выводам. При этом он пользовался статическим и кинематическим методами и получил идентичные результаты.

Все эти работы не учитывали упругих свойств материалов: образовался разрыв между теорией упругости и строительной механикой. Это повлекло за собой постановку исследований на стыке отдельных направлений механики: использовались различные методы, и наряду с теоретическим исследованием, проводилась экспериментальная проверка результатов (интересно, что даже такой глубокий математик, как П. Л. Чебышев, при разработке теории наилучшего приближения функций полиномами, наименее уклоняющимися от нуля, провел значительную экспериментальную работу).

В строительной механике середины XIX в. возникла проблема расчета свода как упругого тела. Эту проблему пытался решить ученик Клапейрона — Шарль Бресс (1822—1883). Его работу повторил, хотя и самостоятельно, немецкий ученый Отто Мор (1835—1918). Вскоре появилась новая задача — проблема теории ферм. Быстрое развитие железнодорожного строительства выдвинуло на первый план расчет и сооружение мостов: с середины XIX в. теория ферм становится одной из важнейших задач теории сооружений. Важные исследования в этом направлении выполнил русский инженер Д. И. Журавский (1821—1891). Он принимал участие в проектных и строительных работах при сооружении мостов Петербургско-Московской железной дороги, а затем руководил Департаментом железных дорог. При расчете многопролетной

неразрезной фермы Журавский впервые применил метод деформаций. Дальнейшие работы в области теории ферм выполнили Шведлер (1823—1879), Ламе и Максвелл.

В середине XIX в. начались поиски графических методов решения задач механики. Векторное исчисление находилось в процессе становления, но воспроизведение графическими методами параметров статики имело уже достаточную историю: еще в 1687 г. Ньютон и Вариньон установили закон параллелограмма сил, ставший основанием для создания графических методов. Позже Вариньон предложил метод веревочного многоугольника. Ряд графических построений предложили Клапейрон и Ламе.

В 1859 г. английский физик и механик Маккуорн Ренкин (1820—1872), профессор университета в Глазго, предложил рассматривать ферму как веревочный многоугольник, по которому и строился многоугольник сил. На графике Ренкина отрезки были параллельны стержням фермы и равнялись усилиям в них. Используя эту идею, Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879) разработал учение о взаимных фигурах и показал, что построения графической статики дают взаимные фигуры. Работа Максвелла была опубликована в 1864 г. Через два года вышел труд цюрихского профессора Карла Кульмана (1821—1881) «Графическая статика», где были собраны все решенные этим методом задачи и дано соответствующее решение для ряда задач строительной механики. Дальнейшее развитие графическая статика получила в трудах профессора Римского политехникума Луиджи Кремона (1830—1903); метод графического расчета ферм, предложенный им на основе идей Максвелла, носит название диаграммы Кремона — Максвелла.

Так в механику проникли графические методы расчета; начиная с 70-х годов века они проникают и в учение о машинах, где создаются важные разделы графической динамики и графической кинематики. Такой обмен методами и идеями является прогрессивным и способствует развитию и возникновению новых направлений науки, при этом зачастую он происходит между далеко отстоящими одно от другого научными направлениями.

До середины XIX в. теория упругости и гидромеханика не соприкасались в своем развитии. Однако в 1845 г. Джордж Стокс (1819—1903) обнаружил общие свойства у твердых тел и вязких жидкостей. Он пришел к выводу,

что с повышением пластичности вещества упругость его падает, в результате чего твердое тело переходит в состояние вязкой жидкости, следовательно, между твердым телом и вязкой жидкостью нет резкой границы. Стокс изучал также колебания упругих тел.

Большой вклад в создание теории упругости сделал Барре де Сен-Венан (1797—1886). Он считал, что только синтез теоретического и экспериментального исследований может обеспечить действенное развитие науки. Идея эта не нова, ее часто высказывали, но часто и забывали, и в результате этого иногда интересные идеи не могли развиваться в нужном направлении.

Сен-Венан был учеником Политехнической школы и Школы мостов и дорог, по окончании которой некоторое время работал инженером на строительстве каналов, а затем перешел на преподавательскую работу. Он занимался теорией колебаний, теорией пластической деформации, гидродинамикой. Особенно много он сделал в теории упругости: для решения ее задач разработал так называемый полуобратный метод, который применил к решению задач кручения и изгиба призматических стержней и к задаче об изгибе консоли силой, приложенной к ее свободному концу. Позже им были решены также задачи совместного изгиба и кручения. В круг интересов Сен-Венана входила и молекулярная механика. Он пришел к заключению, что при вычислениях, основанных на законе молекулярного взаимодействия, следует допустить, что отдельные частицы не соприкасаются между собой.

Что касается основных понятий механики, то в этом отношении Сен-Венан приближался к идеям Карно. Он считал, что понятие силы имеет весьма метафизический смысл, а потому и силам и массам дал лишь чисто формальные определения, не вникая в сущность явлений.

В 1855 и 1856 гг. Сен-Венан опубликовал два мемуара, в которых изложил принцип, носящий его имя. В более поздней формулировке, которую дал Жозеф Буссиеск (1842—1929), этот принцип гласит: «Разность между действием, произведенным двумя различными, но эквивалентными нагрузками, приложенными к заданной части тела, становится чрезвычайно малой на больших расстояниях от исходного места». Принцип этот является характерной иллюстрацией различия между аналитической и прикладной механикой; он широко применялся инже-

нерами в их практической деятельности, но не был доказан. Соответствующая математическая теория не была создана ни самим автором, ни его последователями.

Последовательнее Сен-Венана в отношении проблемы силы был немецкий физик Генрих Герц (1857—1894). В «Принципах механики, изложенных в новой связи» (опубликованных после его смерти) Герц строит систему механики, исходя лишь из трех независимых представлений: времени, пространства и массы. Силу он исключает из числа основных понятий, равно как и энергию. Он показывает далее, что, в сущности, нельзя отделять механику системы от механики точки: такое разделение является искусственным, ибо любое движение можно рассматривать как движение системы. Он предполагает, что изменения скоростей в результате движения вызываются не действием сил, а наличием некоторых геометрических связей. В таком случае сила есть не что иное, как способ описания последних, применимый при известных допущениях, но отнюдь не обязательный для эффективного познания мира.

Механика Герца предполагала существование эфира, что являлось важной составной частью его системы, и была опровергнута дальнейшим развитием науки. Но многое из нее было воспринято и вошло в фонд механических идей.

Учение Герца явилось одной из попыток обоснования механики, предпринятых в последней трети XIX в. Быстрое развитие механической техники (а к 70-м годам во всех европейских странах, включая Россию, уже завершился промышленный переворот) и обусловленные этим большие достижения в различных направлениях прикладной механики заставили ученых задуматься над основными принципами механики. В XVIII, а затем и в XIX в. наука пополнилась множеством новых факторов. Многие из них не получили достаточного объяснения, поэтому проблема обоснования механики заняла серьезное место.

К концу века развитие механической техники еще более ускорило. Были созданы новые машины: гидравлические и паровые турбины, электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания. С появлением последних облегчилась работа над созданием самодвижущихся экипажей — автомобилей и аппаратов тяжелее воздуха для воздушного транспорта — самолетов. Таким образом, парк энер-

гетических машин увеличился, хотя и не в такой степени, как технологических, который рос чрезвычайно быстро. Сам этот факт весьма интересен. Развитие рабочих машин отвечало потребностям капиталистического производства, поскольку новые машины для обеспечения технологических процессов гарантировали увеличение прибылей, тогда как развитие энергетических машин представляло второстепенный интерес; к паровым машинам за 100 лет привыкли, а к новой энергетике относились без особого доверия. С этим обстоятельством связан и иной факт из истории науки о машинах: паровая машина в течение XIX в. была достаточно хорошо изучена и ее теория составила основное содержание важнейшей отрасли механики — динамики машин; теорию же рабочих машин создать в XIX в. не удалось, да в ней и не было необходимости, поскольку разнообразные типы машин возникали как экспериментальные модели и их рабочие и технологические возможности оценивались практикой и временем.

Таким образом, к концу века наиболее изученной оказалась паровая машина. Однако с повышением рабочих скоростей стационарных и транспортных машин выяснилось, что и здесь не все обстоит благополучно: при больших скоростях обнаруживались нежелательные динамические явления, влекущие за собой аварию. Возникла проблема сил инерции, теоретическая и практическая. Одной из первых работ в области динамики кривошипно-ползунного механизма паровой машины явилась монография австрийского инженера Иоганна Радингера (1842—1901) «О паровых машинах с высокой скоростью поршня», в которой был приведен графический расчет действия сил в этом механизме. Книга была опубликована в 1870 г.

В 1894 г. немецкий корабельный инженер Эрнст Отто Шлик (1840—1913) опубликовал работу об уравнивании поступательно движущихся масс. Эта задача, очень актуальная для того времени, в особенности для судовых паровых двигателей, послужила основой для целого ряда исследований. Таким образом, было начато изучение сил инерции, но в узких пределах и применительно к одному, правда очень важному, механизму. Теоретически же эта проблема осталась неизученной и послужила причиной целого ряда споров и дискуссий.

В 60-х годах XIX в. начинается исследовательская работа над теоретической кинематикой. До этого кинематикой называли теорию механизмов, и она была в основном описательной наукой. Лишь в 1862 г. вышел в свет «Трактат чистой кинематики» профессора Политехнической школы Анри Резаля (1828 — 1896). А в 1853 г. Пафнутий Львович Чебышев (1821 — 1894), основатель и руководитель петербургской математической школы, в работе «Теория механизмов, известных под названием параллелограммов», впервые ввел в теорию механизмов (т. е. в прикладную кинематику) математические методы. По совету Чебышева кинематикой механизмов занялись Джеймс Джозеф Сильвестр и ряд английских ученых, которые работали над вопросом о воспроизведении математических зависимостей при помощи механических средств. Важный вклад в прикладную кинематику сделал выдающийся немецкий машиностроитель Франц Рело (1829—1905). Он сформулировал ее задачи, предложил определения и указал на важнейшую структурную особенность механизмов — существование кинематических пар, т. е. сочетаний звеньев и кинематических цепей — соединений звеньев с помощью кинематических пар.

Чебышев указал на аналитическое направление в решении задач теории механизмов, Рело рассмотрел эту задачу как машиновед, а затем геометры Амеде Маннгейм (1831—1905), Зигфрид Аронгольд (1819—1884) и Людвиг Бурместер (1840—1927) разработали и создали новое направление науки — кинематическую геометрию, на базе которой Бурместер развил геометрический метод синтеза механизмов. Еще раньше Чебышев заложил основы точного и приближенного аналитического синтеза механизмов, а его ученик Либман Израилевич Липкин (1841—1875) решил задачу, поставленную Поселье, — о построении точного механизма (механизм Липкина — Поселье). В 1874 г. доцент Аахенской высшей технической школы Р. Прелль выпустил замечательное произведение «Опыт графической динамики», в котором дал решение целого ряда задач графической кинематики, кинетостатики и статики механизмов. Развитие этих идей было выполнено затем (очевидно, независимо от Прелля) почти одновременно тремя учеными: Отто Мором в 1879—1887 гг., Робертом Смитом в 1885 г. и Бурместером в «Учебнике кинематики», опубликованном в 1888 г. Главным в этих

работах было решение задач кинематики методом планов скоростей и ускорений.

Развитие машиностроения, строительство зданий и путей сообщения способствовало в конце XIX в. появлению интереса к задачам механики сплошной среды: на основе применения математических методов ставятся и решаются новые задачи теории упругости, сопротивления материалов, гидродинамики; начинается интенсивная исследовательская работа над проблемами теории колебаний, теории устойчивости, аэродинамики.

Ученик Сен-Венана — Буссинеск занимался теорией деформации тел. Его работы охватывают большой диапазон проблем механики сплошной среды: он занимался, в частности, теорией колебаний стержней, теорией удара, теорией пластинок. Буссинеск является одним из основоположников механики сыпучих тел. До него изучали лишь продольное равновесие сыпучих масс, он же поставил вопрос об их упругой деформации. Он также решил ряд задач по расчету подпорных стенок.

Джон Уильям Стрэтт, лорд Рэлей (1842—1919) в 1877 г. опубликовал монографию (в двух томах) «Теория звука». Первый том посвящен колебаниям струн, стержней, мембран, пластинок и оболочек. Рэлей пользуется в своем исследовании методом обобщенных сил и обобщенных координат, в частности он показал, что при помощи исследования колебаний можно получить также решения для статических и статически неопределимых систем. Метод Рэрея заключался в сведении задачи о колебании сложной системы к исследованию колебаний с одной степенью свободы; естественно, что решение получалось приближенным. Немецкий физик Вальтер Ритц (1878—1909) усовершенствовал его метод, предложив определять частоты колебаний непосредственно из энергетического условия, без решения дифференциальных уравнений. Метод Рэрея — Ритца получил большое применение в решении задач теории колебаний, теории упругости, теории сооружений и в других областях механики.

Труд Рэрея вместе с монографией Томсона и Тейта «Курс натуральной философии» (1867) составили почти полную энциклопедию «прикладной математики» XIX в. Уильям Томсон, лорд Кельвин (1824—1907) был профессором университета в Глазго. Здесь он организовал фи-

зическую лабораторию, в которой выполнил много важных экспериментальных работ по сопротивлению материалов и теории упругости. «Курс натуральной философии» явился совместной работой его и профессора Эдинбургского университета Петера Гутри Тэйта (1831—1901).

Развитие железнодорожного строительства стало одним из важнейших факторов повышения спроса на сталь. В качестве конструкционного материала сталь впервые появляется при строительстве мостов, затем ее начинают использовать и в иных конструкциях. Так, в 1858 г. под руководством Д. И. Журавского был спроектирован и сооружен стальной шпиль Петропавловского собора в Петербурге высотой (вместе с яблоком и фигурой) 56,43 м.

В последней четверти XIX в. было спроектировано и построено уже большое число перекрытий, куполов и целых зданий из стальных конструкций. Некоторые из них достигали огромных размеров. Например, к Парижской всемирной выставке 1889 г. был построен Дворец машин, в плане 421×145 м — самое большое по пролету сооружение тех лет; вес его конструкций составил 6364 т. Еще большую известность приобрела Эйфелева башня, в определенной степени ставшая символом Парижа. Однако в свое время многие были против ее сооружения, считая подобную металлическую конструкцию в высшей степени антихудожественной. Построил ее инженер и механик Александр Гюстав Эйфель (1832—1923). Высота башни вместе с флагштоком достигает 312,275 м. Земляные работы по устройству фундамента башни были начаты в январе 1887 г., в июле того же года началась сборка металлоконструкций, закончилось строительство 30 марта 1889 г.

Сооружения такого типа поставили перед механикой целый ряд новых проблем. Среди них важное место заняла проблема устойчивости. Несколько задач, относящихся к этой проблеме, было решено еще в середине века, но авторы решений уделяли недостаточное внимание условиям закрепления концов, поэтому решения зачастую расходились с практическими результатами и инженеры предпочитали пользоваться различными эмпирическими формулами. Существенный вклад в это направление сделал Феликс Станиславович Ясинский (1856—1899). По окончании Петербургского института путей сообщения он работал инженером на строительстве Петербурго-Вар-

шавской и Петербургско-Московской железных дорог, занимался проектированием и сооружением металлических мостов, а в 1894 г. перешел в институт на должность профессора по теории сооружений и теории упругости. Одним из первых он исследовал устойчивость сжатых раскосов ферм мостов и выяснил условия прочности их конструкций. Существенный вклад в создание теории сооружений сделал также профессор Политехнического института в Карлсруэ Фридрих Энгессер (1848—1931).

Еще позже, чем теория сооружений, выделилась в качестве самостоятельной ветви механики аэродинамика. Возникла она в результате соединения наблюдений и опыта, с одной стороны, и глубокой математической обработки полученных экспериментальных результатов — с другой. К тому времени воздухоплавание с помощью управляемых аэростатов было уже достаточно хорошо освоено. Так, в конце 1884 г. французскими инженерами Ренаром и Кребсом была создана довольно удачная модель аэростата. Она представляла собой тело вращения с несимметричными концами длиной 50 м и 8,4 м в диаметре (наибольшей окружности сечения). Источником питания служила батарея аккумуляторов, приводившая во вращение ротор мотора, на котором был жестко закреплен пропеллер. Мощность мотора составляла 3,5 л. с. Поэтому еще в 90-х годах века общепринятым было мнение, что полет человека будет осуществлен с помощью аэростатов. Так, Д. И. Менделеев в статье «О сопротивлении жидкостей и о воздухоплавании» (1880) утверждал, что аэростат надежнее машин тяжелее воздуха и что покорение воздуха будет, очевидно, осуществлено с его помощью. В те годы в воздух поднимались лишь модели аэропланов, первый в мире подъем аппарата тяжелее воздуха был осуществлен между 1882 и 1885 г.: самолет, который построил Александр Федорович Можайский (1825—1890), поднялся в воздух и пролетел короткое расстояние.

Создание аэродинамики в значительной степени связано с именем Николая Егоровича Жуковского, «отца русской авиации», по выражению В. И. Ленина.

Н. Е. Жуковский (1847—1921) по окончании Московского университета стал доцентом, а затем профессором Высшего технического училища. Позже он получил кафедру прикладной механики в Московском уни-

верситете. Первые его работы были посвящены вопросам гидромеханики, при этом он стремился выяснить картину движения, найти его отчетливый геометрический образ. В 1889 г. он начал эксперименты по аэродинамике и в 1892 г. опубликовал первую работу в этом направлении «О парении птиц». Он составил уравнения динамики для центра тяжести птицы и определил его траекторию при различных условиях движения воздуха. В 1902 г. в кабинете прикладной механики Московского университета он построил аэродинамическую трубу, проводившиеся на ней опыты дали ему материал для теоретических обобщений. В 1894—1898 гг. Жуковский интенсивно работал над изучением полета тел тяжелее воздуха. Наряду с исследовательской и педагогической работой занимался популяризацией своих идей: читал доклады, в которых доказывал, что основным средством овладения воздухом должны стать аппараты тяжелее воздуха.

Существенный вклад в науку в XIX в. внесли две женщины. Первая из них, Софи Жермен (1776—1831), самостоятельно изучила математику; была в переписке с Лагранжем, Гауссом, Фурье. В 1811 г. за мемуар, посвященный колебаниям упругих пластинок, она получила премию Парижской академии наук. Ее дальнейшие работы были посвящены главным образом математическим вопросам теории упругости. Жермен явилась одним из основоположников математической физики как отдельного научного направления.

Первая русская женщина-математик Софья Васильевна Ковалевская (1850—1891) вынуждена была и учиться и работать вне пределов России: на родине не нашлось работы, соответствовавшей ее научным возможностям. В 1884 г. она получила должность профессора в Стокгольмском университете. Здесь она прочла 12 различных курсов, в том числе курс механики. В конце жизни Ковалевская была избрана членом-корреспондентом Петербургской академии наук, что, однако, не дало ей права преподавать в России. В области механики особенно существен ее вклад в теорию гироскопов: в 1888 г. она опубликовала «Задачу о вращении твердого тела вокруг неподвижной точки», в которой указала на новый случай гироскопа. Впервые после Эйлера и Лагранжа в этой области механики было сказано новое слово. Как писал С. И. Вавилов, «ее вклад, внесенный за

ее недолгую жизнь, был необычайно полноценен и многозначителен. Ее фундаментальное исследование по вращению твердого тела послужило основой для дальнейшего развития важнейших вопросов механики в нашей стране и во всем мире».

Революция в технике нашла свое отражение в искусстве, в частности в живописи. Еще в XVIII столетии английский художник Джозеф Райт (1734—1797) целиком посвящает свое творчество индустриальной тематике. В ленинградском Эрмитаже хранится его картина, относящаяся к 1773 г., «Кузница изнутри». Кисти его современника, шведского художника Пера Гиллестрема (1732—1816) принадлежит более 120 картин с изображением металлургических заводов, сталелитейных, пушечных, стеклодувных мастерских. На его полотнах впервые «заиграл» раскаленный металл в отблесках на машинах и лицах людей.

С увеличением числа машин, и особенно изобретением механического транспорта, возникает двойственное отношение к технике: в искусстве появляется тема одновременно ужаса и преклонения перед машинами. Это нашло отражение, например, в иллюстрациях английского машиностроителя и художника Джона Мартина (1789—1854) к «Потерянному раю» Мильтона и к Библии.

Если в XVIII столетии механическое движение в искусстве олицетворял кузнец, то с наступлением XIX в., века машин, «цеховая» тематика расширяется. Начиная от Франсуа Бономма и кончая Адольфом Менцелем, работавшим в последней четверти века, объектом живописи становится машинный труд. При этом художники стремятся изобразить машины как можно точнее. Иногда точность такова, что их картинами можно иллюстрировать, например, курс описательного машиноведения. Знаменитое полотно Менцеля «Прокатный цех» является одним из лучших примеров: художник работал над ним в течение пяти лет, с 1870 по 1875 г., и не только досконально изучил натуру, но и проштудировал десятки специальных книг.

Еще одним примером «стыковки» механической техники и искусства является творчество интереснейшего английского художника-карикатуриста Хита Робинсона, длившееся с конца XIX до 30-х годов XX в. Этот художник уже откровенно смеется над машинами, вернее, над

увлечением своих современников машинами. «Смешное» в его картинах достигается несоответствием между затраченной работой и ничтожностью полученного результата, тем более что роль двигателя в машинах Робинсона обычно отводилась людям.

Художник создавал свои машины, исходя из абсурдного принципа; цели, для которых они применялись, мягко выражаясь, были весьма странными, их детали и агрегаты — немыслимыми. Однако они были кинематически правильно построены, и их можно было воспроизвести в натуре как работающие модели. Робинсон приводил к абсурду структуру машин и их производительность, а как раз эти вопросы волновали машиноведов того времени.

Репутация художника среди инженеров была высокой, и не одна его идея была использована при создании новых машин. В годы первой мировой войны Робинсон начал «изобретать» военные машины и аппараты. Некоторые его «изобретения» оказались настолько «пророческими», что Робинсоном заинтересовался британский Генеральный штаб, желая узнать, откуда у него информация о секретном вооружении. Трудно было представить, что это всего лишь вымысел художника.

* * *

Итак, на протяжении XIX в. механика, равно теоретическая и прикладная, добилась больших успехов. Математизация механики, начавшаяся в XVIII в. и оказавшаяся чрезвычайно плодотворной для развития самой математики, продолжается и в XIX столетии. Математизируются и иные направления физики. В течение века были созданы или заново прочитаны такие главы физики, как оптика, учение о теплоте, электричество и магнетизм. Подобно механике, они содействуют развитию новых математических теорий и разработке нового математического аппарата. При этом выясняется, что различные и, казалось бы, несхожие физические процессы и явления описываются с помощью одних и тех же математических положений. Это приводит к мысли о возможности сродства и между самими явлениями и к развитию новых направлений науки. Так возникла, в частности, теория колебаний, объединившая исследование аналогичных явлений в механике, оптике, учении о звуке, учении о теплоте,

электричестве. Оказалось, что и сама физика — не совокупность разрозненных и чуждых друг другу учений, а единая во всем разнообразии своих проявлений наука.

При развитии наук действуют дифференциальные и интегральные тенденции. Первые направлены на размежевание наук, на поиски самостоятельных путей развития: создаются собственная терминология, символика, собственный научный язык. Другая тенденция — искать решение проблемы с помощью методов, заимствованных у иной науки, а иногда на стыке двух различных наук или двух областей человеческой деятельности, часто сильно отдаленных друг от друга. Интегральные тенденции привели к новым направлениям в науке.

НАУКА НА ПЕРЕПУТЬЕ

С начала XIX в. в физике, механике, математике стали обнаруживаться факты, которые не укладывались в стройную картину классической науки. Первым из них стала неевклидова геометрия Лобачевского.

Николай Иванович Лобачевский (1792—1856) родился в Нижнем Новгороде. В 1807 г. он был зачислен студентом Казанского университета и с этого времени связал свою жизнь с Казанью. 11 февраля 1826 г. на заседании физико-математического факультета Казанского университета он прочел доклад «Сжатое изложение основ геометрии со строгим доказательством теоремы о параллельных», в 1829 г. опубликовал в «Казанском вестнике» мемуар «О началах геометрии», содержащий изложение начал неевклидовой геометрии.

С положениями Лобачевского согласились лишь немногие, а критиков оказалось достаточно, причем критика велась далеко не в дружественных тонах. Даже М. В. Остроградский в своем отзыве написал, что работа Лобачевского «ниже посредственного». Настолько непонятной и противоречащей здравому смыслу казалась геометрия, в которой через одну точку можно было провести бесконечное число линий, параллельных заданной. Право-

ту Лобачевского признал, в частности, Гаусс (1777—1855), который сам, по-видимому, пришел к подобным мыслям, но не публиковал их. Общее признание идея Лобачевского получила лишь после его смерти, когда в 1868 г. итальянский геометр Эудженио Бельтрами (1835—1900) доказал ее непротиворечивость.

Приблизительно в те же годы, что и Лобачевский, независимо от него, к идеям неевклидовой геометрии пришел также венгерский геометр Янош Бойяи (1802—1860), открытие которого было опубликовано в 1832 г. в «Дополнении» к сочинению его отца Фаркаша Бойяи (1775—1856) «Опыт введения учащегося юношества в начала математики — элементарной и высшей».

Итак, даже в самой точной из наук, в математике, оказалось не все ясным. Несколько позже возникли спорные вопросы и в механике. В 1874 г. вышел в свет первый том «Лекций по математической физике» Густава Роберта Кирхгофа (1824—1887) с изложением воззрений автора относительно принципов, лежащих в основе механики. Он высказал мнение, что понятия массы и силы не являются для механики основными: силу Кирхгоф считал понятием производным, а массу — лишь коэффициентом в уравнении, определяющем величину силы. Он утверждал, что объяснять явление не надо, следует лишь описать его, выразив сущность соответствующими математическими уравнениями. Предмет механики, по Кирхгофу, состоит в простейшем, но полном описании явлений, происходящих в природе, с установлением их качества и характера, но не причины. Описание явлений вместо их пояснения, предложенное Кирхгофом, совпадало с идеалистической теорией познания Маха.

В XVIII в. математика развивалась под влиянием запросов механики, в XIX роль «основного заказчика» переходит к математической физике, одним из основоположников которой был Жан Жозеф Фурье (1768—1830). В 1822 г. он опубликовал монографию «Аналитическая теория тепла», в которой были развиты основные методы новой науки. Уже к середине века начались поиски сродства между термодинамикой и механикой. В 1850 г. немецкий физик-теоретик Рудольф Клаузиус (1822—1888) высказал мысль, что теплота есть не что иное, как проявление живой силы молекул. В 1857 г. он опубликовал мемуар «О роде движения, которое мы называем

теплотой», где изложил кинетическую теорию газов. В соответствии с этой теорией молекулы газов движутся прямолинейно с постоянной скоростью, пока не ударятся о другие молекулы или о непроницаемую стенку, тогда они получают новые направления движения, но живая их сила в среднем сохраняет свою величину.

Начиная с 1866 г. Людвиг Больцман (1844—1906) проводит серию опытов по молекулярно-кинетической теории газов, в частности делает попытку найти распределение энергии между молекулами. Его исследовательский метод был таким: он рассматривал не мгновенное состояние системы, а средние значения; так впервые в механику начала проникать статистика. Сам Больцман пришел к мысли, что в области микромеханики господствуют вероятностные законы и что статистика не только является удобным способом описания явлений, но эти явления принципиально статистические. Уже в 1877 г. Больцман сказал о втором начале термодинамики, что оно имеет отношение к исчислению вероятностей; это выявляется в том, что его, это начало, можно аналитически доказать лишь при помощи теории вероятностей.

Следующий шаг в этом направлении сделал американский физик-теоретик Джозайя Уиллард Гиббс (1839—1903), который в 1902 г. опубликовал свой классический труд «Основные принципы статистической механики со специальным применением к рациональному обоснованию термодинамики». Статистическая механика рассматривает всякую величину, суммарно характеризующую некоторое физическое тело, как функцию очень большого числа механических величин, описывающих состояние атомов или молекул. Естественно, что такая механическая величина зависит и от времени — следовательно, наблюдаемые температура, давление и другие величины на самом деле являются лишь средними значениями. Больцман и Максвелл пытались определить эти средние значения, но, учитывая, что изучаемые величины являются функциями координат и скоростей отдельных молекул, брали их не во времени, а в пространстве.

Гиббс считал, что, несмотря на свое «термодинамическое» происхождение, статистическая механика не является лишь подсобным методом, а имеет самостоятельное значение. Он представлял тело как систему чрезвычайно большого числа частиц — ансамблей, поведение которых

описывается законами механики, а ансамбль — совокупностью точек в фазовом пространстве, ввел понятия фазы системы — совокупности значений всех ее координат и импульсов для некоторого момента времени, фазового пространства и фазового объема.

Итак, на рубеже XIX и XX вв. возникает еще один подход к решению задач механики, использующий аппарат теории вероятностей и математической статистики.

Это повлекло за собой и некоторые философские выводы: если законы Ньютона допускают широкое толкование и к ним можно применять коррективы, то не значит ли это, что описание явления не отражает его действительной сущности, а является лишь некоторой условностью, не имеющей отношения к реальности? Формализация вопроса об описании явления приводила в конце концов к отрицанию объективной реальности вообще: к такому выводу пришел, в частности, профессор Пражского университета, Эрнст Мах (1838—1916), физик-экспериментатор и философ-идеалист.

Появление подобных идей в механике и физике не ушло от внимания Энгельса. В очерках, посвященных диалектике природы, он выясняет сущность основных понятий механики: движения, силы, энергии — и показывает их материалистическое содержание. «Движение, рассматриваемое в самом общем смысле слова, т. е. понимаемое как способ существования материи, как внутреннее присущий материи атрибут, — пишет он, — обнимает собой все происходящие во вселенной изменения и процессы, начиная от простого перемещения и кончая мышлением... изучение природы движения должно было исходить от низших, простейших форм его и должно было научиться понимать их прежде, чем могло дать что-нибудь для объяснения высших и более сложных форм его. И действительно, мы видим, что в историческом развитии естествознания раньше всего разрабатывается теория простого перемещения, механика небесных тел и земных масс; за ней следует теория молекулярного движения, физика, а тотчас же вслед за последней, почти наряду с ней, а иногда и опережая ее, наука о движении атомов, химия. Лишь после того как эти различные отрасли познания форм движения, господствующих в области неживой природы, достигли высокой степени развития, можно

было с успехом приняться за объяснение явлений движения, представляющих процесс жизни...

Вся доступная нам природа образует некую систему, некую совокупную связь тел... В том обстоятельстве, что эти тела находятся во взаимной связи, уже заключено то, что они воздействуют друг на друга, и это их взаимное воздействие друг на друга и есть именно движение. Уже здесь обнаруживается, что материя немыслима без движения. И если далее материя противостоит нам как нечто данное, как нечто несотворимое и неуничтожимое, то отсюда следует, что и движение несотворимо и неуничтожимо»¹.

Переходя к анализу понятий силы, энергии и работы, Энгельс пишет: «Представление о силе заимствовано, как это признается всеми... из проявлений деятельности человеческого организма по отношению к окружающей его среде... Иными словами, чтобы избавиться от необходимости указать действительную причину изменения, вызванного какой-нибудь функцией нашего организма, мы подсовываем некоторую фиктивную причину, некоторую так называемую силу, соответствующую этому изменению. Мы переносим затем этот удобный метод также и на внешний мир и, таким образом, сочиняем столько же сил, сколько существует различных явлений... Таким образом, прибегая к понятию силы, мы этим выражаем не наше знание, а *недостаточность* нашего знания о природе закона и о способе его действия»².

И далее: «Сила. Когда какое-нибудь движение переносится с одного тела на другое, то, *поскольку движение переходит*, поскольку оно активно, его можно рассматривать как причину движения, *поскольку это последнее является переносимым*, пассивным, и в таком случае эта причина, это активное движение выступает как *сила*, а пассивное движение — как ее *проявление*. Согласно закону неуничтожимости движения, отсюда само собой следует, что сила в точности равна своему проявлению, так как ведь в обоих случаях это — *одно и то же движение*. Но переносимое движение более или менее поддается количественному определению, так как оно проявляется в двух телах, из которых одно может служить

единицей-мерой для измерения движения в другом. Измеримость движения и придает категории *силы* ее ценность... Таким образом, чем более доступно измерению движение, тем более пригодны при исследовании категории *силы* и ее проявления»³.

Очень важное значение для обоснования механики имеют две работы Энгельса, входящие в «Диалектику природы»: «Основные формы движения» и «Мера движения. — Работа». В первой из них Энгельс исследует различные формы движения; второй очерк посвящен исследованию понятия о мере движения. Мы видели, что спор между последователями Декарта и Лейбница касался именно этого понятия. Вопрос не был решен и в XVIII в.

Энгельс подошел к анализу спора о мере движения с историко-научной точки зрения. Изложив его сущность и известные аргументы о том, что он фактически не имеет реального содержания и является всего-навсего спором о словах, Энгельс замечает: «Но ведь казалось бы, что не может все же целиком сводиться к бесполезному спору о словах спор, начатый таким мыслителем, как Лейбниц, против такого мыслителя, как Декарт, и столь занимавший такого человека, как Кант, что он посвятил ему свою первую печатную работу — довольно объемистый том. И действительно, как согласовать, что движение имеет две противоречащие друг другу меры, что оно оказывается пропорциональным то скорости, то квадрату скорости?»⁴ Подвергнув затем философскому анализу мнения по этому вопросу, высказанные Д'Аламбером, Томсоном и Тэйтом, Гельмгольцем и другими учеными, Энгельс приходит к выводу, что «механическое движение действительно обладает двойкой мерой, но... каждая из этих мер имеет силу для весьма определенно ограниченного круга явлений. Если имеющееся уже налицо механическое движение переносится таким образом, что оно сохраняется в качестве механического движения, то оно передается согласно формуле о произведении массы на скорость. Если же оно передается таким образом, что оно исчезает в качестве механического движения, воскресая снова в форме потенциальной энергии, теплоты, электричества и т. д., если, одним словом, оно превращается в

¹ Маркс К., Энгельс Ф. Соч., т. 20, с. 391—392.

² Там же, с. 402—403.

³ Там же, с. 595—596.

⁴ Там же, с. 410.

какую-нибудь другую форму движения, то количество этой новой формы движения пропорционально произведению первоначально двигавшейся массы на квадрат скорости»⁵.

Интенсивная работа над вопросами теоретического естествознания привела к тому, что количество непонятных фактов увеличилось; они возникали и в физике, и в механике, и в математике. Кроме того, стало выявляться, что аппарат, который математики предоставляли в распоряжение физиков и механиков, не всегда удовлетворял этих последних и им приходилось создавать свой собственный. Так, во второй половине XIX в. совместными усилиями физиков, механиков и математиков было создано в целом ряде вариантов и разновидностей векторное исчисление, а физиком и инженером Хевисайдом — операционное исчисление.

Оливер Хевисайд (1850—1925) самоучкой стал крупнейшим специалистом в области электротехники слабых токов. Он также глубоко изучил математику и убедился, что она не может предоставить для его исследований пужный математический аппарат. В качестве такого аппарата он разрабатывает операционное исчисление. Но вскоре обнаруживает, что его можно применять не только в электротехнике, но и к решению некоторых проблем геологии, к задачам теории термоэлектричества, теории поля и вопросам движения электронов. Одним из первых Хевисайд указал на явление роста массы движущегося заряда при чрезвычайно высоких скоростях.

Хевисайд не стремился к точности и безукоризненности своих математических построений, и это принесло ему много неприятностей. Впоследствии операционное исчисление было строго обосновано, но вначале метод Хевисайда просто отказывались публиковать.

Нужно сказать, что операционное исчисление явилось одним из первых направлений прикладной математики конца XIX в. Если в XVIII столетии под прикладной математикой понималась чуть ли не вся физика и механика с добавлением целого ряда технических направлений, а в XIX в. прикладной математикой обычно называлась аналитическая механика, то в последних годах XIX в. так называют уже различные математические тео-

⁵ Маркс К., Энгельс Ф. Соч., т. 20, с. 418.

рип, не всегда строго обоснованные, но всегда имевшие практическое применение (как мы увидим дальше, в 60-х годах XX в. содержание прикладной математики вновь изменяется).

На основании глубокого изучения проблем естествознания, Энгельс пришел к мысли о неизбежности революции в естествознании: «...Может статься, — писал он, — что прогресс теоретического естествознания сделает мой труд, в большей его части или целиком, излишним, так как революция, к которой теоретическое естествознание вынуждается простой необходимостью систематизировать массу накаплиющихся чисто эмпирических открытий, должна даже самого упрямого эмпирика все более и более подводить к осознанию диалектического характера процессов природы. Прежние неизменные противоположности и резкие, непреходимые разграничительные линии все более и более исчезают»⁶.

Революция в естествознании не заставила себя ждать. Уже на рубеже веков были обнаружены явления, объяснить которые наука не могла. В 1895—1897 гг. начинается крушение понятия о неизменном атоме как о первичной и неделимой частице. Ряд открытий показал, что атом имеет сложное строение, а его структурным элементом является электрон, который был открыт в 1897 г. В 1895 г. Рентген открыл особого рода излучение, в 1896 г. Беккерель обнаружил явление радиоактивности урана. Попытки объяснить эти явления с помощью старых физических теорий не увенчались успехом. Дальнейшие открытия привели к мысли при пояснении новых явлений отказаться от общепринятых классических положений. Открытие радия М. Склодовской и П. Кюри в 1898 г. содержало в себе и частичное объяснение явления. В 1899 г. П. Н. Лебедев измерил давление света. В 1900 г. М. Планк предложил квантовую теорию излучения. В 1902 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди создали теорию радиоактивного распада — возникла новая идея о возможности превращения элементов. В 1905 г. А. Эйнштейн выступил со специальной теорией относительности, а затем установил соотношение между массой и энергией, что было невозможным в системе «старой» классической механики Ньютона.

⁶ Маркс К., Энгельс Ф. Соч., т. 20, с. 13.

Кажущееся уничтожение материи в явлениях радиоактивности и взаимосвязь материи и энергии в теории относительности повлекли за собой ряд выводов, поставивших под сомнение реальность внешнего мира («Материя исчезла, остались одни уравнения»). Некоторые ученые пришли к мысли, что физические теории и понятия не отражают реальных процессов объективно существующих вне нашего сознания, а лишь условные знаки, подобранные для удобства систематизации фактов.

Первой книгой, в которой кризис в физике напел свое истолкование и были показаны пути выхода из него, явилось произведение В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм», написанное им в феврале — октябре 1908 г., а в мае 1909 г. опубликованное московским издательством «Знание». «Суть кризиса современной физики, — писал В. И. Ленин, — состоит в ломке старых законов и основных принципов, в отбрасывании объективной реальности вне сознания, т. е. в замене материализма идеализмом и агностицизмом»⁷.

«Материализм и эмпириокритицизм» — философский труд, в котором получила свое дальнейшее развитие марксистская философия, где подвергнуты исчерпывающей критике реакционная буржуазная идеалистическая философия и философский ревизионизм. Дальнейшее развитие здесь получила формулировка Энгельсом основного вопроса философии — о соотношении материи и сознания. Но здесь же нашли свое пояснение и научные открытия конца XIX — начала XX в. «Современная физика... — отмечает Ленин, — идет к единственному верному методу и единственно верной философии естествознания не прямо, а зигзагами, не сознательно, а стихийно, не видя ясно своей «конечной цели», а приближаясь к ней ощупью, шатаясь, иногда даже задом»⁸. Физики в начале XX в. пробовали пояснить те явления, которые выходили за межи классической науки, но они еще не были в состоянии овладеть идеей о непрерывном, диалектическом развитии самой науки. Ленин указывает, что реальным выходом физики из кризиса был и стал путь диалектического метода в науке. «Материалистический основной дух физики, как и всего современного естествознания, победит все

⁷ Ленин В. И. Полн. собр. соч., т. 18, с. 272—273.

⁸ Там же, с. 332.

и всяческие кризисы, но только с неперменной заменой материализма метафизического материализмом диалектическим»⁹.

В механике процесс идеологических шатаний привел к созданию новой картины мира в связи с появлением теории относительности.

Важную роль в становлении теории относительности сыграли работы профессора Лейденского университета Гендрика Антона Лоренца (1853—1928). Им было найдено преобразование (так называемое преобразование Лоренца), в котором время играет роль четвертой координаты. Это преобразование позволило объяснить некоторые результаты, полученные при наблюдении оптических и электродинамических явлений. Наряду с теоретическими исследованиями Лоренца в развитии новой физики определенную роль сыграли опыты Альберта Майкельсона (1852—1931). Они показали, что скорость света в вакууме является универсальной постоянной. Приблизительно к этому же времени (80-е годы XIX в.) относится критика Эрнстом Махом ньютоновых понятий абсолютного пространства и абсолютного времени. Все это в совокупности, как и работы французского математика и механика Анри Пуанкаре (1854—1912), объективно послужило основой для создания новой области физики — теории относительности.

В 1905 г. Альберт Эйнштейн (1879—1955) публикует свою знаменитую работу «К электродинамике движущихся тел». Все его предшественники, включая и Пуанкаре, рассматривали проблему теории относительности лишь в рамках электродинамики, Эйнштейн же подошел к ней с принципиально новых позиций. Он порвал с ньютоновой концепцией абсолютного пространства и времени¹⁰.

⁹ Там же, с. 324.

¹⁰ На могиле Ньютона в Вестминстерском аббатстве выбито четверостишие его современника, поэта Александра Попа:

Был шар земной
Густой тьмой окутан,
Рек бог — да будет свет!
И се родился Ньютон.

Известно и его продолжение:

Но сатана недолго ждал реванша,
Пришел Эйнштейн,
И стало все, как раньше!

В его формулировке принцип относительности и принцип постоянства скорости света гласили: 1. Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к которой из двух координатных систем, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга, относятся эти изменения состояния. 2. Каждый луч света движется в покоящейся системе координат с определенной скоростью, независимо от того, испускается ли луч света покоящимся или движущимся телом.

В 1906 г. Макс Планк (1858—1947) применил принцип относительности к уравнениям динамики и заложил основы релятивистской динамики. Тогда же Эйнштейн опубликовал статью «Принцип сохранения движения центра тяжести и инерция энергии», в которой описал мысленный эксперимент, устанавливающий связь между энергией светового импульса и силой света. В 1908 г. Герман Минковский (1864—1909) предложил геометрическую интерпретацию теории относительности: мир есть многообразие всех мыслимых значений трех измерений пространства совместно с четвертым измерением — временем.

Следующим шагом в разработке теории относительности явилась работа Эйнштейна «Основы общей теории относительности», в которой он сформулировал постулат относительности: законы физики должны быть составлены так, чтобы они были справедливы для произвольно движущихся систем. Общая теория относительности Эйнштейна была опубликована в 1916 г. Ее основные понятия были тесно связаны с проблемой гравитации; в сущности, Эйнштейн пришел к своей общей теории от изучения гравитации. При этом оказалось, что геометрией такой теории является неевклидова геометрия, которую первым начал разрабатывать Н. И. Лобачевский.

Путь неевклидовой геометрии к признанию был нелегким: ни Лобачевский, ни Бойяи при жизни его не получили. Лишь к концу седьмого десятилетия XIX в. эти идеи начали развиваться. Большая заслуга здесь принадлежит Бельтрами, который при изучении поверхностей постоянной отрицательной кривизны («псевдосферических») установил, что для них имеет место геометрия Лобачевского. В 1868 г. он опубликовал «Опыт пояснения неевклидовой геометрии», сыгравший важную роль в признании и дальнейшем развитии идей Лобачев-

ского. Далее, геометрическую концепцию пространства выдвинул Бернгард Риман (1826—1866). Он ввел понятие обобщенных «римановых пространств», частными случаями которых явились пространства Евклида и Лобачевского. Английский геометр Уильям Клиффорд (1845—1879) обосновал связь геометрии и физики. Грегорио Риччи-Курбастро и Туллио Леви-Чивита в 1901 г. опубликовали «Метод абсолютного дифференциального исчисления и его приложения», где было разработано тензорное исчисление. Как видим, на этот раз математики создали аппарат, необходимый для развития идей теории относительности.

Однако и теория относительности не сразу получила признание: до 20-х годов продолжалась ее критика. Повторилась история с неевклидовой геометрией Лобачевского. Уж слишком необычным было новое миропонимание: теория относительности заставила по-новому взглянуть на движение электронов, планет и галактик в космическом пространстве.

Тем временем земная механика продолжала оставаться в рамках, предписанных ей Ньютоном. На протяжении 25 лет (1890—1915) техника решила ряд задач epochального значения. Был создан двигатель Дизеля, найдена удобная в эксплуатации форма паровых турбин, изобретен автомобиль и найден способ использования электроэнергии для нужд транспорта. Было изобретено радио, человек поднялся в воздух на аппарате тяжелее воздуха, и началось быстрое развитие авиации. Машиностроение поставляло на рынок все новые и новые модели, усовершенствовались и изобретались новые машины для обработки металлов. Все это влияло и на направление исследований в прикладной математике и в прикладной механике.

Как мы уже знаем, аэромеханика была главным исследовательским направлением Н. Е. Жуковского. В 1906 г. он опубликовал работу «О присоединенных вихрях», в которой развил теорию возникновения подъемной силы крыла аэроплана. Здесь им были сформулированы известная теорема об определении величины подъемной силы и гипотеза о величине циркуляции скорости. В сущности, этими двумя положениями и были заложены основы аэромеханики. В 1911 г. Н. Е. Жуковский теоретически установил профили крыльев, а в 1912 г. начал

работать над созданием теории пропеллера. Он создал вихревую теорию, исходя из которой нашел подъемную силу и лобовое сопротивление лопастей пропеллера и их геометрическую форму. В конце 1903 г. два американских инженера братья Райт, Уилбур (1867—1912) и Орвилл (1871—1948), построили биплан, на котором установили облегченный мотоциклетный двигатель мощностью около 15 л. с. На этом биплане они подыались в воздух и совершили полет, длившийся около минуты, пролетев более 200 м. Такое подтверждение теоретических расчетов Жуковского еще более повысило его убежденность в возможности «механического летания». В начале 1904 г. под его руководством в Кучине был открыт первый в Европе аэродинамический институт, оснащенный большой аэродинамической трубой, а в 1910 г. аэродинамическая труба еще большего диаметра (1,6 м) была сооружена в Московском университете. Тогда же была организована аэродинамическая лаборатория в МВТУ.

Ближайший ученик Жуковского, Сергей Алексеевич Чаплыгин в работах 1909 г. и в позднейших развил теоретическую аэродинамику, в частности теорию профиля крыла самолета. Работал он также в области гидродинамики и газовой динамики, в последней ему принадлежат основополагающие труды.

Существенные результаты в аэродинамике получили Фредерик Ланчестер (1878—1946) и Вильгельм Кутта (1867—1944). Ланчестер был практическим инженером, специалистом в области автомобилестроения. В 1894 г. он опубликовал статью о циркуляционной теории полета, а в 1907 и 1908 гг. развил эту теорию в монографиях. Математик Кутта заинтересовался полетами Отто Лилиентала и в начале XX в. начал разрабатывать теорию полета, в частности повторил теорию Жуковского о крыле бесконечного размаха.

Теоретической аэродинамикой занимался Людвиг Прандтль (1875—1953); он развил учение о турбулентном течении и теорию пограничного слоя. Прандтль заимствовал некоторые идеи у Ланчестера, но упорно отказывался признать его приоритет¹¹. В 1918 г., воспользовав-

шись выводами Жуковского и собственными теоретическими изысканиями, он предложил свой вариант профиля крыла.

С теорией о турбулентном движении жидкости связано важное явление вихреобразования. Понятие о вихре было изучено еще в начале XIX в., но лишь в 1883 г. Осборн Рейнольдс (1842—1912) установил существование предела, определяемого некоторым безразмерным параметром (называемым теперь числом Рейнольдса), при достижении которого меняется характер потока: спокойное, ламинарное, течение переходит в завихренное, турбулентное. Затем было обнаружено, что турбулентное течение свойственно не только потоку жидкости в трубах; аналогичные явления возникают и в пограничном слое при движении тел в жидкости (или газе), если число Рейнольдса достаточно высоко.

Впервые теорию пограничного слоя развил Прандтль в 1904 г. в докладе на III Международном математическом конгрессе в Гейдельберге.

Таким образом, в теории пограничного слоя и теории вихреобразований аэродинамика смыкалась с гидродинамикой. Здесь также важные исследования были выполнены Н. Е. Жуковским. Он развил теорию струй, изучил движение твердого тела (снаряда) с полостью, заполненной жидкостью, занимался теорией турбин, исследовал удар воды в водопроводных трубах. В том же направлении работали его ученики Леонид Самуилович Лейбензон (1879—1951) и Георгий Федорович Проскура (1876—1958). Лейбензон занимался теорией пограничного слоя, исследовал течение вязкой жидкости (нефти) по трубам, Проскура исследовал теорию насосов и гидравлических турбин.

Еще одним направлением научной деятельности Н. Е. Жуковского стала механика машин. Его теорема о жестком рычаге является одним из самых элегантных

¹¹ Впрочем, случай с Прандтлем не является исключением. В своей книге о развитии аэродинамики Карман рассказывает, что великий английский физик Дж. Дж. Томсон, когда ему впервые

сообщали о чем-либо новом, только покачивал головой. На другой день он вообще отказывался этому верить, но через три дня в беседе с тем, кто впервые сообщил ему об идее, говорил: «А теперь я расскажу Вам о чем-то новом», затем следовало изложение знакомой идеи, которое заканчивалось словами: «Ну что, понимаете, в чем задача?» (*Kármán T. Aerodynamics. Selected-topics in the light of their historical development. Ithaca, New York, 1954*).

методов кинестатики. Ученик Жуковского — Николай Иванович Морцалов (1866—1948) написал курс прикладной механики, в котором впервые с исчерпывающей полнотой были освещены вопросы динамики машин. Курс этот был издан в 1904 г. и переиздан в 1914—1916 гг.

В первых годах века появляются работы Виттенбауэра, посвященные задачам кинестатики механизмов. Фердинанд Виттенбауэр (1857—1922) применил методы статики к решению задач движения механизмов. Его обобщающий труд «Графическая динамика» вышел посмертно в 1923 г.

Леонид Владимирович Ассур (1878—1920) является основоположником учения о структуре и классификации механизмов. Он получил также важные результаты в области кинематики и кинестатики плоских механизмов любой сложности.

Исследования Василия Прохоровича Горячкина (1868—1935) относились к теории сельскохозяйственных машин, которой до него практически никто не занимался. Как известно, сельскохозяйственные машины чрезвычайно разнообразны и сложны по своей структуре, в них используются пространственные механизмы, теория которых трудна, и поверхности сложного профиля (например, отвал плуга). Кроме того, работают они в тяжелых условиях. Горячкин внес в это направление механики вклад основополагающего значения. Он не только создал «земледельческую механику» как науку, но и заложил основы общей теории рабочих машин.

Основы динамики тела переменной массы заложил чешский ученый Георг фон Бюкуа еще в 1812—1814 гг.¹² Однако в то время исследования его не получили дальнейшего развития. Позже некоторые задачи в этом направлении были решены английскими учеными Кэйли, Раусом и др. Существенно продвинули теорию механики тела переменной массы русские ученые К. Э. Циолковский и И. В. Мещерский. Преподаватель гимназии г. Калуги Константин Эдуардович Циолковский (1857—1935), работы которого послужили основой нового научного направления — ракетодинамики, сперва заинтересовался

теорией и принципами построения цельнометаллического дирижабля, позже (начиная с 1896 г.) начал заниматься теорией ракетного движения, хотя отдельные мысли в этом направлении он публиковал и раньше. Его проекты ракет датируются 1903, 1914 и 1915 гг.

Профессор Петербургского политехнического института Иван Всеволодович Мещерский (1859—1935) свое научное творчество подчинил одной цели — созданию основ механики тела переменной массы. В 1897 г. была опубликована его работа «Динамика точки переменной массы», где он установил исходные уравнения теории, из которой второй закон Ньютона вытекает как частный случай (через 31 год после Мещерского его выводы повторил итальянский механик Леви-Чивита). В 1904 г. в работе «Уравнения динамики точки переменной массы в общем случае» Мещерский заложил основы теории полета аппаратов с реактивным двигателем.

И. В. Мещерским и коллективом преподавателей механики Петербургского политехнического института был создан «Задачник по курсу теоретической механики», переведенный на ряд языков и вплоть до настоящего времени считающийся лучшим пособием в мировой учебной литературе по механике.

На рубеже веков продолжались исследования и в других направлениях механики, при этом для решения задач начали применять новые, более мощные математические методы. В 1872 г. немецкий геометр Феликс Клейн (1849—1925), профессор университета в Эрлангене, выступил с так называемой «эрлангенской программой», в которой указал на необходимость творческого сотрудничества математики с прикладными науками. Клейн организовал при Геттингенском университете семинар по применению математики к прикладным наукам. Важное значение он придавал истории науки и сам написал «Историю математики XIX века» в двух томах. С 1901 по 1914 г. Клейн руководил изданием «Математической энциклопедии», причем сам редактировал в ней отдел механики. Им были подготовлены четыре тома, охватывающие теоретическую и прикладную механику.

В области теории упругости influentialную школу в Германии создали профессор Мюнхенской высшей технической школы Август Феппл (1854—1924) и его сын, преемник по кафедре, Людвиг Феппл. Ученик А. Феппла

¹² См.: Михайлов Г. К. К истории динамики систем переменного состава и теория реактивного движения. М., Институт проблем механики АН СССР, 1974, с. 5.

ля — Прандтль стал ближайшим сотрудником Клейна и директором созданного в Геттингене Института прикладной механики. Прандтль занимался теорией пластинок и решил ряд прикладных задач теории упругости. В 1904 г. в Геттингене под руководством Прандтля начал работать Теодор фон Карман, который занимался исследованиями в области устойчивости колонн в пластическом состоянии. Он занимался также вопросами деформации балок и труб. Работы Прандтля и Кармана положили начало новой отрасли механики материалов — теории пластичности.

Первые годы XX в. характеризовались повышенной активностью машиностроителей. Появление новых типов машин, в особенности транспортных, заставило обратить серьезное внимание на материалы, применяемые в машиностроении, и на совершенствование расчетных методов теории упругости. Степан Прокофьевич Тимошенко (1878—1971), бывший в первые годы XX в. профессором Петербургского института инженеров путей сообщения, решил ряд задач изгиба и кручения призматических стержней. Важное значение в теории упругости получили в это время двумерная и трехмерная задачи. Для решения двумерной задачи Г. В. Колосов (1877—1936) воспользовался аппаратом теории функций комплексного переменного. Эти идеи были развиты его учеником Н. И. Мусхелишвили, который изучил концентрацию напряжений и впервые учел связь термических и силовых напряжений. Решение трехмерной — пространственной задачи было дано С. П. Тимошенко, А. Фепплем, К. Рунге. Значительно позже, в конце 20-х годов, Мусхелишвили предложил и в этом случае использовать методы теории функций комплексного переменного.

В начале XX в. возникает новое направление строительной механики — строительная механика корабля. Одним из ее основоположников был Алексей Николаевич Крылов (1863—1945). Им были созданы работы по теории движения корабля, по теории вибраций, гироскопии и ряду вопросов чистой и прикладной математики. В частности, он выполнил перевод с латинского языка «Математических начал натуральной философии» Ньютона, что стало важным вкладом в русскую научную литературу. Широкую известность приобрели его очерки по различным вопросам истории отечественной и мировой науки.

К началу XX в. относится становление так называемой неголономной механики. Этим термином Герц предложил называть системы, движение которых подчинено неинтегрируемым кинематическим связям, и впервые использовал его в своих «Основаниях механики» (1894). В 1895 г. С. А. Чаплыгин составил дифференциальные уравнения движения системы в обобщенных голономных координатах при наличии линейных неголономных связей и равного числа циклических координат. В 1899 г. французский ученый Поль Аппель (1855—1930) получил систему очень простых уравнений, с помощью которых изучил некоторые вопросы неголономной механики. Важный вклад в теорию внес профессор Киевского университета Петр Васильевич Воронец (1871—1923). Впервые он занялся неголономной механикой в 1901 г. Позже вывел общие уравнения движения неголономных систем. В 1909 г. в работе «Задача о движении твердого тела» и в следующих ввел условие зависимости силы лишь от положения точки на поверхности.

В тесной связи с неголономной механикой находится динамика живых организмов, основополагающие работы которой опубликовал в первом десятилетии века профессор Екатеринославского (Днепропетровского) горного института Ярослав Иванович Грдина (1871—1931).

На стыке многих направлений — механики, математики, различных отраслей техники — возникла в конце XIX в. теория устойчивости. Основополагающие работы в этом направлении принадлежат Анри Пуанкаре и А. М. Ляпунову. Александр Михайлович Ляпунов (1857—1918) был учеником П. Л. Чебышева, по его рекомендации выбрал тему для своей магистерской диссертации, которую развил затем в научное направление. Докторская диссертация А. М. Ляпунова «Общая задача об устойчивости движения» (1892) послужила источником многих направлений математики и механики и до сих пор служит сокровищницей новых идей.

* * *

Период, охватывающий конец XIX и два первых десятилетия XX в., оказался чрезвычайно плодотворным в истории развития теоретической и прикладной механики. В эти годы были высказаны многие идеи, развитые впоследствии в целые научные направления. Некоторые из

этих идей и открытий не укладывались в рамки классической науки и явились теми «катализаторами», с которых началась коренная перестройка в естествознании.

1917 год стал естественным рубежом в истории механики. События Великой Октябрьской социалистической революции и последовавшей гражданской войны повлияли на развитие отдельных направлений механики в нашей стране и таким образом на развитие всей мировой науки.

НОВЫЕ РУБЕЖИ

Для механики 20-х годов XX в. характерен повышенный интерес к сравнительно небольшому числу проблем: аэродинамике, гидродинамике, теории рабочих машин, неголономной механике. Большинство же направлений, над которыми трудились ученые в начале века, почти не развивались. Одновременно весьма активно велись чисто математические исследования, возникали новые математические школы.

Такая направленность легко объяснима. Народное хозяйство молодой Советской Республики (как и стран Западной Европы) переживало период восстановления, требовавший быстрых, чисто технических решений, с другой стороны, материальные возможности для развития экспериментальной, прикладной науки были весьма ограничены, а теоретическая наука могла развиваться и при минимальных затратах. Иным было положение в США. В 20-х годах в Америку эмигрировали многие ученые из стран Западной Европы, которые там занимались больше решением конкретных задач для нужд промышленности, чем теоретическими исследованиями. В частности, для развития механики в США существенное значение имел переезд туда в 1922 г. С. П. Тимошенко, которому принадлежат важные работы по теории упругости, сопротивлению материалов и строительной механике.

Между тем большинство направлений механики уже достигло в своем развитии такого положения, когда нужны были не только идеи, но и материальная база для их

претворения в жизнь. В частности, так обстояло дело с авиацией, на развитие которой не жалели средств, ибо польза от такого капиталовложения была очевидной.

Исследованиями в области аэрогидродинамики занимались многие ученые. Во Франции был организован институт механики, директор которого Анри Вилла поставил и решил ряд задач современной аэродинамики. Французские исследования в этом направлении были подготовлены работами Буссинеска, Пуанкаре и Адамара. Буссинеск изучал вопросы гидродинамики в самом широком диапазоне: течение жидкости в открытых и закрытых каналах, движение подземных вод, давление в жидкости и др. Жак Адамар (1865—1963) изучал проблему распространения волн и развил ее математический аппарат — теорию уравнений в частных производных.

В Советском Союзе развитие науки в 20-х годах характеризуется становлением математических школ и исследовательских коллективов в области аэродинамики, гидромеханики и строительной механики.

Наука в старой России была связана со столицами и с небольшим числом провинциальных городов. Громадные районы России — Урал, Поволжье, Кубань, почти вся Сибирь, Дальний Восток и области, населенные «инородцами», были лишены и высшего образования, и науки. В 20-х годах начинается развитие науки в этих краях. Так, в Грузии усилиями А. М. Размадзе, Г. Н. Николадзе, Н. И. Мухелишвили и А. К. Харадзе возникает школа в области математики и механики. Буквально на пустом месте начинается исследовательская работа в Минске, Ереване, Ташкенте, Нижнем Новгороде, Свердловске, Баку.

Очень важную роль в развитии советского математического естествознания сыграла московская математическая школа, основанная Д. Ф. Егоровым и его учеником Н. Н. Лузиным. К этой школе принадлежат такие крупные ученые, как П. С. Александров, М. А. Лаврентьев, А. Н. Колмогоров, И. И. Привалов, Д. Е. Меньшов, Н. К. Бари, М. В. Келдыш, В. В. Голубев и др. В истории мировой науки математическая школа Н. Н. Лузина является уникальным событием: никогда не собиралось вместе столько талантливых математиков, как в стенах Московского университета в 20-х годах. Н. Н. Лузин и его ученики развили ряд важнейших направлений мате-

матики и создали математический аппарат для решения многих задач теоретической и прикладной механики.

Большое внимание обращается на практические направления науки. В это время наука начала приобретает новые организационные формы: и в системе Академии наук, и вне ее организуются научно-исследовательские институты. Для развития механики особенное значение имела организация в 1918 г. Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ), в 1921 г. — Физико-математического института Академии наук и Московской сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева, где были поставлены исследования по сельскохозяйственной механике под руководством В. П. Горячкина и Н. И. Мерцалова. В 1919 г. на Украине была создана Академия наук, вторая в стране, в составе которой был открыт Институт технической механики. В первой половине 20-х годов научно-исследовательские институты математики и механики были открыты в составе Ленинградского, Московского и Казанского университетов. Создание сети научно-исследовательских учреждений благоприятно повлияло на развитие исследований в области механики. Уже в 20-х годах, кроме традиционных школ в Ленинграде и Москве, возникают исследовательские коллективы в Киеве, Харькове, Днепропетровске, Тбилиси.

Важнейшие исследования в области механики в СССР были связаны с именем Н. Е. Жуковского и его учеников. Они начали изучать ламинарное и турбулентное движение, теорию вихрей, гидродинамику идеальной и вязкой жидкости. В теории струй основополагающие работы выполнил С. А. Чаплыгин. Его труд «О газовых струях» имел важное значение для развития аэродинамики: в сущности, впервые основные задачи теории крыла и теории винта были поставлены вне зависимости от задач гидродинамики. Чаплыгин изучил также устойчивость профиля крыла и выяснил обстоятельства неустановившихся движений крыла.

Значительные работы в области механики идеальной жидкости, характеризующиеся переходом от классической постановки к принципиально новым решениям, выполнил профессор Ленинградского университета Н. М. Гюнтер, в 20-х годах бывший председателем Ленинградского математического общества.

С появлением автомобильного, а затем авиационного

транспорта повысился интерес к нефти и ее транспортировке. Возникла практическая задача движения вязкой жидкости. В СССР над ее решением работал один из учеников Жуковского — Л. С. Лейбензон, принимавший участие в организации Бакинского университета. Однако самыми важными задачами аэрогидродинамики на протяжении 20-х — 30-х годов продолжали оставаться те, что были связаны с теорией самолета. В эти годы Н. Е. Кочин решил задачу об установившемся движении круглого в плане крыла в идеальной несжимаемой жидкости, В. В. Голубев развил теорию мапущего крыла, А. А. Дородницын решил задачу полета для случая стреловидного крыла и крыла, летящего со скольжением. Идеи Жуковского и Чаплыгина получили дальнейшее развитие в работах А. И. Некрасова, М. А. Лаврентьева, М. В. Келдыша, Л. И. Седова.

В 20-х годах был сделан существенный «задел на будущее» в трудах В. П. Горячкина и его сотрудников. Горячкин разработал основания теории резания грунтов и динамики сельскохозяйственных машин. Теория резания грунтов, развитая советскими учеными, получила большое практическое значение в горном деле и строительном производстве. Что касается динамики рабочих машин, то исследовательская методика Горячкина была использована при разработке их теории и процессов.

Кинематика механизмов развивалась в 20-х годах в направлении решения задач теории пространственных механизмов, значение которых возросло в связи со становлением авиационного и сельскохозяйственного машиностроения. Бурное развитие машиностроения в довоенные пятилетки заставило обратить внимание на создание его теоретических основ. Сложность задач кинематики пространственных механизмов вызвала поиски общей методики решения. Первым обратился к изучению пространственных механизмов Н. И. Мерцалов. И. И. Артоболовский, Н. Г. Бруевич и В. В. Добровольский в начале 30-х годов начали развивать идеи Л. В. Ассура.

Возрождение интереса к проблемам механики машин приблизительно в эти же годы происходит в Германии. После выхода в свет монографии Виттенбауэра «Графическая динамика» (1923) основным исследовательским направлением становится синтез механизмов по Бурместеру. На основе работ Бурместера, Грюблера и Миллера

профессор Дрезденской высшей технической школы Г. Альт развивает геометрический метод синтеза плоских механизмов. Синтез механизмов — способы создания новых механизмов для воспроизведения требуемых законов движения — становится одной из важнейших задач механики машин. Делается попытка создать такой метод синтеза, который можно было бы выполнить путем ряда проб (эмпирический метод Рау, развитый немецкими учеными). Сочетая методы Ассура и Бурместера, советские машиноведы начинают поиски новых методов анализа и синтеза механизмов. В середине 30-х годов И. И. Артоболевский (1905—1977) создает научную школу в области теории механизмов и машин. Впервые на рубеже механики и теоретических основ машиностроения возникло новое научное направление, использующее в равной степени теорию и эксперимент, а также классическое наследие Эйлера, Карно, Д'Аламбера и Монжа.

Огромные преобразования, происшедшие в народном хозяйстве нашей страны в 30-х годах, не могли не отразиться и на развитии механики как науки. Некоторые проблемы, имевшие ранее только теоретическое значение, получили важные критические применения. К ним относилась, в частности, проблема устойчивости. Эта проблема имеет важное значение для самых различных областей науки и техники, имеющих дело с системами, состояниями и процессами. Ляпунов в монографии «Общая задача об устойчивости движения» (1892) решил эту задачу для систем с конечным числом степеней свободы. Н. Г. Четаев (1902—1959) применил теорию Ляпунова к проблеме неустойчивости движения и решил ряд технических задач, относящихся к устойчивости полета снаряда и устойчивости самолета. В 1936 г. он предложил постулат устойчивости, содержащий требование малых отклонений между теорией и экспериментом.

Методы Ляпунова нашли применение также в учении о колебаниях. Учение о колебаниях было развито еще в XIX в., когда было установлено, что самые различные явления, относящиеся к механике, акустике, учению о теплоте, электротехнике, оптике и др., приводятся к колебательным процессам и описываются с помощью сходных математических моделей. Для исследования колебательных процессов сперва применялся аппарат теории линейных дифференциальных уравнений, дававших доста-

точно хорошие результаты. Однако уже задачи радиотехники оказались нелинейными, как и многие другие задачи техники: повышение рабочих скоростей заставило обратиться к нелинейной теории колебаний. К началу 30-х годов в Советском Союзе ею занимались две школы: Л. И. Мандельштама, Н. Д. Папалекси и А. А. Андропова, которые исходили из нелинейной теории радиоколебаний, применяя при этом методы Пуанкаре и Ляпунова, и киевская школа Н. М. Крылова и Н. Н. Боголюбова, развивавшая асимптотические методы. Исследования Крылова и Боголюбова, выполненные в первой половине 30-х годов, привели к созданию нового научного направления, получившего название нелинейной механики. Методы нелинейной механики тогда же были применены к решению важнейших задач строительной механики, авиастроения, машиностроения, электротехники и радиотехники.

В 30-х годах одно из первых мест по важности технических применений заняли вопросы механики сплошной среды. В области теории упругости Н. И. Мусхелишвили (1891—1976) и его ученики исследовали плоскую задачу при помощи методов теории функций комплексного переменного. В середине 30-х годов Б. Г. Галеркин (1871—1945) построил теорию изгиба пластинок и начал исследования по теории оболочек, которые привели к значительным результатам: он обеспечил большую точность расчетов и распространил теорию на оболочки средней толщины. Предложенное им приближенное решение для цилиндрической оболочки дало возможность рассчитывать трубопроводы под произвольной нагрузкой.

Подобные задачи были необходимы для строительной техники. В это же время возникают и комплексные проблемы, относящиеся одновременно к строительной механике, теории упругости и теории устойчивости, например проблема устойчивости упругих систем, теория стержневых систем. А. Н. Динник (1876—1950) развил теорию устойчивости элементов сооружений и применил методы теории упругости к решению задач горной механики, в частности к теории прочности шахтных каналов. П. Ф. Папкович (1887—1946) решил ряд общих задач теории устойчивости и развил экспериментальные методы изучения прочности корабля. А. Н. Крылов занимался строительной механикой корабля. Его работа «О расчете

балок, лежащих на упругом основании» (1930) явилась важным вкладом в строительную механику. Во второй половине 30-х годов В. М. Майзель начал исследования в области термоупругости, которые продолжил А. Д. Юваленко.

Важным методом исследования напряжений в машинных деталях стал оптический метод, который разрабатывали как советские, так и зарубежные (английские, американские) ученые. Оформилось новое направление механики — теория пластичности, начало которой было положено еще в 1864 г., когда французский ученый Треска обобщил результаты своих опытов над поведением материалов, находящихся под большим давлением. Математическая теория пластичности была построена в 1870—1871 гг. Сен-Венаном и Морисом Леви: в ее основу были положены эксперименты Треска и некоторые его выводы. В начале XX в. вопросами теории пластичности занимались немецкие и французские ученые, но с середины 30-х годов инициатива переходит к советским ученым. Ряд задач решил С. А. Христианович, С. Л. Соболев рассмотрел, в частности, состояние, переходное от упругого к пластичному, математической теорией пластичности занимался Л. С. Лейбензон.

Развитие строительства, и в частности железнодорожного и дорожного, стимулировало проведение исследований в области механики сыпучей среды и механики грунтов. Механика грунтов возникла на базе теории упругости, теории сыпучих тел и гидромеханики, таким образом, она развивалась как наука на стыке ряда направлений механики и физических теорий. Здесь заслуги принадлежат Н. М. Герсеванову, который выяснил условия совместной работы деформируемых оснований и возводимых на них сооружений. В связи с механикой грунтов находится теория резания грунтов, основы которой заложил В. П. Горячкин. Эта теория была использована при проектировании рабочих органов плугов и землеройных горных, строительных и дорожных машин.

В 20-х—30-х годах возникла теория фильтрации как направление, связывающее идеи теории грунтов и гидродинамики. Непосредственной причиной создания теории фильтрации явились задачи гидротехнического строительства, а также эксплуатации нефтяных месторождений. Впервые задачи фильтрации были сформулированы

Н. Е. Жуковским и австрийским ученым Форхеймером. Идеи Жуковского развил Н. С. Павловский; в 1921 г. исследования в области подземной гидравлики начал Л. С. Лейбензон, в 30-х годах он решил задачу о движении границы раздела двух жидкостей в пористой среде.

В связи с развитием авиации все большее значение получают исследования движений крыла и винта самолета. В аэродинамических исследованиях воздух рассматривался как несжимаемая жидкость. Однако переход к высоким скоростям движения летательных аппаратов, ракет и артиллерийских снарядов заставил обратить внимание на изменение плотности воздуха и его температуры, зависящее от медленного или взрывного его сжатия. Так возникла газовая динамика. Важное значение получили теория волн, теория турбулентности, теория пограничного слоя. Явления, связанные с возникновением турбулентности, затруднили повышение скорости летательных аппаратов, поэтому конструкторы стремились создать в пограничном слое условия ламинарного движения; некоторые результаты в этом направлении были достигнуты к концу 30-х годов.

Во второй половине 30-х годов развивается работа по созданию машин автоматического действия: в США, Германии, Советском Союзе начинается интенсивная поисковая работа над теорией автоматов. Важную роль в этом отношении сыграли труды И. И. Артоболевского и С. И. Артоболевского. В начале 30-х годов в Ленинградском политехническом институте С. В. Вяхирев и Н. И. Колчин организовали первую в Советском Союзе кафедру теории машин автоматического действия. Одним из первых советских ученых, работавших в этом направлении, был А. П. Иванов. В 1937 г. он опубликовал работу «Методика построения механизмов машин-автоматов» и в дальнейшем неоднократно обращался к этой теме.

В 30-х годах началась разработка механики материалов и теории их прочности. Большие объемы строительных работ, новые отрасли машиностроения (авто- и авиастроение, транспортное и др.) требовали металла все более высокого качества. Кроме того, новые требования на строительные и машиностроительные материалы определили поиски новых материалов с заранее заданными свойствами.

Возникают и новые методы обработки металлов, важнейшим из них стала электросварка. Основоположником сварки в Советском Союзе был выдающийся мостостроитель Е. О. Патон (1870—1953). Интересно, что происхождение сварки связано с одной из важнейших отраслей технологии строительных работ — скрепления элементов металлических конструкций. В 1929 г. Патон организовал при кафедре инженерных сооружений Всеукраинской академии наук электросварочную лабораторию со штатом шесть человек. Одной из первых задач, поставленных и решенных лабораторией, было определение надежности и прочности сварных соединений железных конструкций. В 1934 г. на базе лаборатории был открыт Институт электросварки АН УССР. На протяжении 30-х годов была разработана технология электросварки и решены многие задачи прочности сварных соединений. В 1939—1940 гг. Патон завершил создание нового метода скоростной автоматической сварки под флюсом, который получил широкое распространение в годы Великой Отечественной войны.

Метод соединения элементов металлоконструкций при помощи сварки был лишь одним из практических выходов прикладной механики. 20-е — 30-е годы принесли много проблем, связанных с созданием новых конструкций. В строительную практику начал внедряться железобетон, появились рамные конструкции, элементы которых работают в основном на изгиб. Для расчета таких конструкций были созданы новые методы, основанные на учете деформаций. Если для XIX в. характерной конструкцией мостов были фермы, то в 30-х годах XX в. вновь появились арки, а это поставило перед строительной механикой новые задачи.

Применение железобетона как строительного материала отразилось и на конструкциях гражданского и индустриального строительства: существенное значение получили пластины и оболочки. Это определило разработку механики пластин и оболочек, а также теории устойчивости. Судостроение и авиастроение также внесли свой вклад в развитие этих теорий: практика определила теоретическую и экспериментальную работу по изучению условий устойчивости и неустойчивости конструкций и их отдельных элементов. Проблема устойчивости приводит к дифференциальным уравнениям, точное решение которых

часто бывает затруднительным, приходится искать приближенное решение.

Таким образом, казалось бы, чисто практическая задача переводится на язык математики и решается уже как математическая: возникает математическая теория устойчивости. В 1934 г. немецкий ученый В. Флюгге разработал математическую теорию равновесия колебаний и устойчивости тонких оболочек, которая в свое время широко применялась при расчете самолетных фюзеляжей, бойлеров, паровых котлов.

В годы, предшествовавшие Великой Отечественной войне и послевоенные, произошло перераспределение научного потенциала, которым обладали отдельные страны. В середине 30-х годов в связи с фашистской оккупацией стран Средней Европы многие ученые покинули родину и переселились в США, эмиграция продолжалась и в послевоенные годы. Это обусловило возникновение в Америке ряда научных школ и направлений, в то же время оживилась научная работа в Японии, Италии, ФРГ.

С другой стороны, в странах социалистического лагеря в результате социальных преобразований, происшедших после второй мировой войны, были созданы научные учреждения, в частности стали развиваться исследования в области механики в Болгарии, Румынии, Чехословакии, Венгрии, Польше, Югославии, ГДР.

Изменились и интересы исследователей, работавших в разных направлениях механики. Интересы эти в значительной части оказываются обусловленными практически задачами, поэтому в аналитической механике проявляется большой интерес к динамике тела переменной массы, неголономной механике, теории гироскопов. Большое распространение получает нелинейная механика, занимавшая важное место в исследованиях колебательных процессов; идеи теории колебаний пересекались едва ли не со всеми направлениями прикладной механики. Новые задачи решались строительной механикой. Развиваются динамика машин, теория машин автоматического действия. На стыке идей алгебры, биомеханики и теории регулирования возникает новая наука, кибернетика, основоположником которой стал Норберт Винер (1894—1964). При создании кибернетики были использованы идеи многих ученых, в частности сам Винер ссылается на А. Н. Колмогорова,

Механика сплошной среды занимает в исследованиях все более и более важное место, поскольку ее идеями пользуются не только в механике упругого, жидкого и газообразного тела, но и в механике машин, в строительной механике. Обусловлено это тем, что во всех областях все большее внимание уделяется условиям, близким к реальным или моделирующим реальные. Например, в гидроаэродинамике классические идеализированные схемы оказались уже не в состоянии обеспечить адекватные решения поставленных проблем. В связи с этим при исследовании движений с большими дозвуковыми, околосзвуковыми и сверхзвуковыми скоростями начали учитывать сжимаемость среды, тепловые условия, перешли к изучению нестационарных задач плоского движения и к трехмерным задачам. В области механики упругого тела все большее внимание привлекают задачи, в которых изучаются упругопластическое и вязкопластическое состояние, ползучесть, нелинейные упругопластические колебания, условия поверхностного состояния, условия термоупругости и т. п. Все большее значение получают исследования, находящиеся на стыке различных направлений механики, а также на стыке механики и математики, геологии, метеорологии, биологии...

В середине 50-х годов XX в. начинается период современной научно-технической революции.

ОТ НАУКИ К ТЕХНИКЕ

Уже с середины 50-х годов нашего века резко меняются и тематика научных исследований, и ее темпы. Одной из характерных особенностей научно-технической революции является то, что наука становится непосредственно производительной силой: она вызывает к жизни технические решения, определяет появление новых отраслей техники, новых видов производства. В ее развитии теперь преобладает интегральный путь, когда новое направление возникает на стыке других, зачастую весьма разнородных.

Например, в механике применение методов графостатики к решению задач динамики механизмов определило

становление кинестатики и, наоборот, кинематическое графоаналитические методы нашли применение в строительной механике. Применение методов гидродинамики к решению задач теории трения вызвало к жизни гидродинамическую теорию смазки, появились новые направления на стыке теории колебаний со строительной механикой, механикой машин, механикой материалов и т. д. В результате современная механика разделилась на много направлений, которые сливаются, с одной стороны, с математикой, с другой — с различными направлениями техники (такое промежуточное положение между чистой абстракцией и конкретной практикой было характерно для механики со времен ее зарождения). Поэтому классификация направлений механики в ее современном состоянии оказывается очень трудным делом, ибо границы между направлениями расплывчаты и неустойчивы.

Мы видели, что древнейшим из учений механики являлось учение о покое — статика; учение о движении возникло значительно позже. Затем возникла теория колебаний, и уже в XX в. — теория устойчивости. С точки зрения объекта исследования можно различать механику микромира, механику сплошной среды, механику твердого тела и системы тел, небесную механику. Некоторые разделы механики системы развились в самостоятельные научные направления, в частности механика тела переменной массы, неголомомная механика, теория гироскопов. К механике сплошной среды относятся сопротивление материалов, механика материалов, теория упругости, теория пластичности, гидравлика, гидродинамика, аэродинамика, газовая динамика, механика плазмы. Уточняя объект исследования, развивается строительная механика, механика машин, механика корабля, механика самолета, баллистика, механика ракетного движения, механика живых организмов, биомеханика. Все эти науки постоянно взаимодействуют, дробятся и порождают новые направления — «статическая» классификация наук теперь просто невозможна, поскольку науки находятся в непрерывном развитии.

Но есть общее между различными направлениями механики, свойственное периоду научно-технической революции. Это учет реальных условий работы изучаемых объектов, обусловленный ростом рабочих скоростей и параметров. Новые отрасли производства, возникающие в

связи с развитием атомной энергетики, освоением космоса, постройкой машин большой мощности, должны иметь высокую степень надежности, подтвержденную точностью расчетов. Создание электронных вычислительных машин, позволивших механизировать вычислительные работы, также является одним из аспектов современной научно-технической революции.

С середины 50-х годов в механике машин начинается быстрое развитие экспериментальных и математических методов исследования и как следствие переход к изучению машин в реальных условиях их работы. По инициативе И. И. Артоболевского в теоретическом машиностроении с успехом стали применять метод динамики тел переменной массы. Металлургические, строительные, горные, полиграфические, текстильные, сельскохозяйственные и другие машины имеют в своем составе механизмы с переменной массой, частичная потеря массы влияет на динамику всей системы в целом.

Все большее значение приобретает синтез механизмов, а задачи синтеза механизмов вплотную соприкасаются с проблемами теории машин автоматического действия и с проблемой создания роботов и манипуляторов. Технические устройства, предназначенные для воспроизведения функций человеческой руки, широко применяются в современных производствах: в атомной энергетике, при космических исследованиях, при исследовании морских глубин, для работы при высоких температурах, в химической промышленности и т. п.

В 60-х — 70-х годах появилось много работ в области нелинейной механики, обусловленных в первую очередь потребностями техники. Но многие исследования определялись также и чисто теоретическими интересами, и пересечение их с техническими проблемами явилось уже вторичным, т. е. наука готовила почву для дальнейшего развития техники. В. Н. Челомей создал оригинальный приближенный метод сведения колебательных систем с большим числом степеней свободы с параметрическим возбуждением к одностепенной системе и применил его к решению важных практических задач, в частности для исследования крутильно-изгибных колебаний коленчатых валов авиационных двигателей с периодически изменяющимися моментами инерции, а также динамической устойчивости различных упругих систем и механизмов с

переменными массами и упругими характеристиками. Есть целая группа задач, при решении которых необходимо учитывать зависимость возмущающей силы от движения колебательной части системы или совместное движение колебательной системы и источника возбуждения. К такого рода задачам относятся проблемы автоколебательных систем (исследование которых было начато в 1937 г. в работах А. А. Андропова и его сотрудников); сюда относятся автоколебания роторов, автоколебания, возбуждаемые потоком жидкости или газа либо силами трения.

В эти же годы была развита и линейная теория колебательных процессов, важным направлением которой является группа задач, связанных с вибрационными машинами и с вопросами предохранения машин от вибраций и ударов. Особую группу задач составляют проблемы, связанные с переходными процессами, в частности в горных и металлургических машинах. Динамические процессы здесь возникают ввиду прерывности нагрузок и реверсивности движения. Эти процессы могут накладываться друг на друга, вследствие чего напряжения могут во много раз превысить расчетные. Такие задачи рассматривали С. Н. Кожевников и А. Н. Голубенцев. Большое число линейных задач было рассмотрено в работах С. П. Тимошенко, Дж. Ден-Гартога, Я. Коженника и др.

Практические применения теории колебаний чрезвычайно разнообразны. Так, в механике машин результаты ее используются и для устранения нежелательных последствий колебаний, в частности их влияния на человеческий организм, и для построения вибрационных и виброударных машин, находящихся широкого применения в строительстве, горной и металлургической промышленности, машиностроении, химии, пищевой промышленности. Применение машин такого типа в технологическом процессе или для транспортировки материалов оказывается весьма выгодным экономически; они используются в качестве вибротранспортеров, питателей и грохотов, для транспортировки и фракционного разделения сыпучих материалов, в качестве вибрационных мельниц для размельчения, для уплотнения грунта и бетона, в качестве перфораторов и т. п.

В развитии еще одной современной ветви механики — ракетодинамики пересеклись идеи баллистики, динамики

тела переменной массы и целого ряда направлений аэродинамики. Одним из первых ученых, поставивших проблему ракетодинамики и наметивших пути ее решения, был К. Э. Циолковский. Запуском в 1957 г. первого искусственного спутника Земли Советский Союз открыл космическую эру. Переход к практике космических полетов потребовал решения ряда задач об устойчивости полета ракеты и усовершенствования теории гироскопов. В области теории гироскопов большую роль сыграли труды А. Н. Крылова и Б. В. Булгакова. А. Ю. Ишлинский развил прикладную теорию гироскопов, решил ряд задач, относящихся к их стабилизации, создал общую теорию гироскопической рамы, рассмотрел важные нелинейные задачи теории гироскопов. Он заложил также основы современной теории инерциальных навигационных систем, которую уже можно рассматривать как отдельное направление механики.

В области механики сплошной среды значительные исследования проводятся в различных направлениях гидро- и аэродинамики. Практическая их значимость велика. Действительно, движение автомашин, поезда происходит в условиях обтекания током воздуха, движение судна — в условиях обтекания водой. Снаряды, ракеты, самолеты движутся в воздухе. К гидроаэродинамике относится также изучение движения воздушных масс, определяющее метеоэрологические явления, течение жидкостей различной вязкости по трубам, явления фильтрации жидкости, которые необходимо учитывать, например, при добыче нефти или постройке плотин, протекание воды и пара через колеса турбомашин, движение зубчатых колес в картерах, наполненных смазочным маслом, вращение вала в смазанных подшипниках. Все эти явления (и многие другие) требуют решения соответствующих задач механики жидкости и газа. Многие из них были решены за последние 20 лет. Так, в 1960 г. М. А. Лаврентьев открыл новые приложения гидродинамики идеальной жидкости, им были решены важные задачи в области детонации и направленного взрыва. Благодаря его исследованиям взрыв из вечного разрушителя стал созидателем: с помощью взрыва создаются грандиозные земляные или каменно-набросные плотины, дамбы и каналы, производятся вскрышные работы при организации новых карьеров и разрезов для добычи полезных ископаемых.

Еще в 1936 г. в совместной работе М. В. Келдыша и М. А. Лаврентьева была решена плоская задача о движении подводного крыла. Было установлено, что такое крыло при большом погружении ведет себя подобно крылу самолета, а при приближении к свободной поверхности подъемная сила падает. В результате длительных конструкторских разработок было найдено практическое применение этой теории: в 1957—1963 гг. созданы корабли на подводных крыльях типа «Ракета» и «Метеор».

Современные самолеты — результат приложения сил едва ли не всех отраслей и направлений механики: строительной, теории упругости и теории прочности, которые должны обеспечить прочность конструкций, нелинейной механики, учитывающей колебательные процессы, теории устойчивости, теории механизмов и многих других, в особенности же аэродинамики. В связи с повышением скоростей полета и появлением сверхзвуковых самолетов в 60-х годах были проведены глубокие теоретические и экспериментальные исследования в области сверхзвуковых течений газа.

При расчете скорости полета исходят из так называемого числа Маха (M), равного отношению скорости тела к скорости звука в той же среде. При $M < 1$ полет называется дозвуковым, при $M = 1$ — звуковым, при $M > 1$ — сверхзвуковым, при $M > 5$ — гиперзвуковым. Полеты со сверхзвуковыми и гиперзвуковыми скоростями обладают рядом особенностей, затрудняющих расчеты. В связи с этим перед газовой динамикой возникали важные задачи, и в первой половине 60-х годов была начата интенсивная исследовательская работа в этом направлении (В. В. Струминским, А. А. Дородницыным, Л. И. Седовым и другими учеными). Были разработаны расчетные методы для гиперзвуковых скоростей, создана теория сильного взрыва в покоящемся газе и т. д. В результате возникла теоретическая база, облегчившая создание новых высокоскоростных самолетов. В 1955 г. советская авиационная промышленность начала выпускать самолеты типа Ту-104 с двигателями турбореактивного типа. В 1957 г. на пассажирские линии был выпущен самолет Ту-114, а в 1968 г. — Ту-154 с тремя реактивными двигателями, рассчитанный на перевозку 164 человек со скоростью до 1000 км/час на расстояние до 6000 км. Одновременно советская промышленность начала выпускать и турбовинтовые самолеты.

ты. В 1965 г. в СССР был построен самый большой в мире транспортный самолет «Антей» с четырьмя турбовинтовыми двигателями по 15 тыс. л. с. каждый, в 1968 г.— первый в мире сверхзвуковой пассажирский самолет Ту-144. Несколько позже подобные самолеты были построены в США («Боинг-2707»); английская и французская авиапромышленность выпустили совместно самолет «Конкорд». Эти самолеты имеют крейсерскую скорость 2500—3000 км/час.

Для развития теории упругости важное значение имели исследования С. П. Тимошенко и его учеников. Длительное время в этом же направлении работал советский ученый Н. И. Мухелишвили, который решил практически все основные задачи плоской теории упругости в статическом случае. Мухелишвили создал в Грузии большую школу, к которой принадлежат, в частности, Н. И. Векуа, В. Д. Купрадзе и другие ученые. Работы в области теории упругости выполнялись в Армении (школа Н. Х. Арутюняна), на Украине (А. Д. Коваленко, Н. А. Кильчевский и др.), многие задачи были решены А. Ю. Ишлинским, А. И. Лурье и др. Над вопросами теории упругости работают ученые Чехословакии, Англии, Японии. Исследования последних лет, как и в других областях механики, проводятся в наибольшем приближении к реальным условиям, поэтому многие работы в области теории упругости пересекаются с исследованиями по механике машин, гидроаэродинамике, строительной механике, теории пластичности и даже геометрии (работы А. В. Погорелова).

Современная научно-техническая революция вызвала к жизни много новых технических проблем, поэтому сейчас под обобщающим названием «строительная механика» понимают целый ряд самостоятельных наук и научных направлений. Из строительной механики выделились в отдельные направления строительная механика стержневых систем, висячих систем, пластин и оболочек. При этом от статических методов расчета строительных конструкций во многих случаях приходится переходить к кинематическим и динамическим. Значительного развития достигли исследования в области теории устойчивости конструкций.

Особое значение имеет теория упругих пластин (в том числе многослойных) и оболочек, которые становятся од-

ним из важнейших конструктивных решений в мировой строительной практике. К тому же большинство несущих конструкций самолетов, морских и речных судов, транспортных и иных машин также являются оболочками. С помощью оболочек можно перекрывать огромные пролеты без промежуточных опор; например, перекрытие главного здания Киевского аэровокзала является прямоугольной в плане полой оболочкой размером 48×58 м со стрелой подъема 8,9 м, купол Киевского цирка — сборная сферическая оболочка диаметром 41,2 м со стрелой подъема 8,4 м. На Промышленной выставке в пригороде Парижа возведено здание павильона индустриальной техники, несущие конструкции которого состоят из ребристой оболочки и трех железобетонных арок. В плане эта пространственная система представляет равносторонний треугольник со стороной 218 м. Интересным архитектурным решением использования оболочек являются общественные и административные здания г. Бразилиа, построенные архитектором О. Нимейером в 1957—1960 гг.

Механика грунтов и сыпучих сред не является новой наукой, но и она получила в последние годы важное развитие. Еще в 1942 г. В. В. Соколовский для механики сыпучей среды использовал разработанный С. А. Христиановичем приближенный метод характеристик, нашедший также применение в теории пластичности, гидродинамике и газовой динамике. Соколовский развил общий метод решения всех основных задач статики сыпучей среды, находящейся в предельном напряженном состоянии.

Он показал, что задачи давления земли на подпорные стенки, прочности оснований, устойчивости откосов, давления на стенки емкости — лишь частные случаи одной задачи. Дальнейшее развитие теории выяснило многие характерные особенности частных случаев механики сыпучей среды, при этом были решены не только статические, но и динамические задачи, что имело важное значение для подземного и антисейсмического строительства, для расчета погрузочно-разгрузочных и транспортных устройств. Задачи гидроэнергетического строительства и геологии залегания нефти, имеющие непосредственное отношение к механике грунтов и сыпучих сред, были решены с помощью теории фильтрации. В последнее время в связи с увеличением габаритов экскаваторов важное

значение приобретает теория резания грунтов, оказавшаяся на стыке с механикой машин.

Размеры этой книги не позволяют дать даже приблизительное представление о том богатстве идей, которым обладает современная механика. Ее направления многократно пересекаются друг с другом, с различными ответвлениями математики и естественных наук. На стыке наук постоянно появляются новые направления. Так, теория атомов, молекулярная теория, теория спектров излучения, аэродинамика газовых потоков, некоторые направления авиационной техники, электродинамика и другие науки совместно выступают при изучении строения и свойств небесных туманностей, небесных тел, космических структур: зарождается новое научное направление — космическая аэродинамика.

Важным современным направлением исследований является теория космических полетов, а также аэродинамика движения ракет и летательных аппаратов в земной атмосфере со сверхзвуковыми и гиперзвуковыми скоростями. Существенное значение имеют физические, химические и механические аспекты проблемы торможения космических аппаратов при их входе в земную атмосферу и связанные с этим явления оплавления и испарения обшивки.

Проблема турбулентности уже значительное время находится на первом плане исследований и ее актуальность все время возрастает. В частности, важную роль при исследованиях турбулентности имеет характер поверхности аппарата. Почти все теории и эксперименты имеют дело с гладкой поверхностью, тогда как поверхность любого летательного аппарата является в определенной степени шероховатой. Поскольку турбулентность в жидкостях и газах связана с нерегулярными пульсациями и перемешиванием веществ, с ней приходится сталкиваться и при исследовании течений воды в реках и каналах, циркуляции жидкостей и газов через различные гидравлические и газовые машины, при изучении атмосферных явлений.

Проблема движения по воде и в воде с большими скоростями повлекла за собой изучение движений морских животных: на стыке гидромеханики, биомеханики и бионики происходит становление нового исследовательского направления.

На стыке аэродинамики и теории упругости возникает теория аэроупругости. Дело в том, что теоретически предполагается жесткость деталей структуры самолета. При небольших скоростях полета такое предположение допустимо, однако оно несправедливо в случае высоких скоростей, когда возникают эффекты аэроупругости.

При изучении предельных задач теории пластичности имеют дело с разрушением тел. Теория разрушения — одна из самых новых и самых сложных по своему математическому описанию ветвей механики твердого тела. Это направление находится в стадии становления, как и еще ряд проблем, посвященных изучению предельных задач: зачастую они требуют для своего решения большой экспериментальной работы и сложного математического аппарата, который иногда приходится создавать одновременно с решением самой проблемы.

В конце 20-х годов возникла реология. Так называется наука, цель которой — описать, объяснить, измерить и использовать феномены, происходящие в деформированных телах. Таким образом, реология как бы связывает воедино объекты, обычно изучаемые механикой, физикой, химией и инженерными науками. Так как напряжение связано с деформацией, то предмет реологии имеет непосредственное отношение к механике, однако реология не занимается явлениями движения и покоя тел, а изучает материалы и их характеристики, и только в приложениях механический аспект явлений опять выходит на первый план.

Как мы знаем, пути механики часто пересекаются и с искусством. Много общих задач у механики с архитектурой и скульптурой. Современная архитектура поставила перед механикой много новых задач, и зачастую архитектурные сооружения и скульптуры уже сами по себе представляют сложные механические проблемы. Живопись внесла важный вклад в создание начертательной и проективной геометрии, что оказало влияние на развитие едва ли не всех отраслей механики.

В последнее время механика, как и другие науки, все в большей степени становится делом не отдельных ученых, а целых научных коллективов. В XVII в. каждый результат в науке был достижением индивидуальным, ученые работали в одиночку и сплошь и рядом «наступали друг другу на пятки».

Каждый отстаивал свой приоритет, неуступчивым был Роберваль, Гук спорил с Гюйгенсом и Ньютоном, Ньютон — с Лейбницем, Иоганн Бернулли — с братом, Якобом, и с сыном Даниилом.

На протяжении XVIII—XIX столетий резко возрастает объем научных исследований и растет число ученых. И опять нередко в одном и том же направлении, над одной и той же темой трудятся несколько ученых. Но уже появилась научная периодика, и приоритет открытия устанавливается по более ранней публикации. К концу XIX в. появляются и научные коллективы, сперва небольшие; к середине XX в. число таких коллективов растет, да и сами коллективы включают в себя все большее число ученых.

В связи с потребностями практики темпы научных исследований убыстряются, при этом оказывается, что информация в виде научной периодики постоянно опаздывает; возникает необходимость в обмене мыслями и идеями, а также в коллективном обсуждении полученных результатов. Это влечет за собой появление новых форм взаимной информации, начинают собираться специализированные конгрессы, съезды, конференции, симпозиумы и другие виды совещаний.

Международные конгрессы по теоретической и прикладной механике начинают свою историю с 1924 г. В апреле этого года в Дельфте (Голландия) собрался первый конгресс. Второй конгресс собрался в 1926 г. в Цюрихе, третий в 1930 г. в Стокгольме, четвертый в 1934 г. в Кембридже, в Англии, пятый в 1938 г. в Кембридже в США, шестой в 1946 г. в Париже, седьмой в 1948 г. в Лондоне, восьмой в 1952 г. в Стамбуле, девятый (на котором было принято решение ограничить доклады тематикой механики твердых и жидких тел) в 1956 г. в Брюсселе, десятый в 1960 г. в Стресе (Италия), одиннадцатый в 1964 г. в Мюнхене, двенадцатый в 1968 г. в Стэнфорде (США), тринадцатый в 1972 г. в Москве, четырнадцатый в 1976 г. в Дельфте.

Анализ тематики работ, представленных на конгрессы, показывает, что на протяжении 50 лет их деятельности интересы исследователей неоднократно менялись. В последнее время на первом месте по количеству докладов стоит механика жидкостей и газов, а на втором — теория упругого твердого тела и строительная механика. Все бо-

лее важное значение получает теория колебаний, проблемы которой стыкуются с большинством проблем других направлений теоретической и прикладной механики.

ЧТО ЖЕ ДАЛЬШЕ?

Что представляет собой современная механика и каковы пути ее дальнейшего развития?

Средневековые ученые, которых весьма интересовало понятие «современность» пришли к заключению, что это в сущности лишь граница, где прошлое соприкасается с будущим. Мы называем современностью уже достаточно длительный период, связывающий прошедшее с будущим. О прошедшем мы узнаем из истории; зная же, например, путь развития механики в прошлом и ее современное состояние, мы можем экстраполировать его в будущее и в какой-то степени предсказать ее дальнейшее развитие.

«Движение есть форма существования материи»; «Истина неисчерпаема» — эти два философских утверждения можно поставить в качестве эпиграфа к изложению любой теории любой ветви механики. Механика не завершается совокупностью законов; Ньютон не упразднил законов, найденных до него, а критически пересмотрел и ввел в свою теорию те из них, которые выдержали проверку. Даже в границах классической механики в XX в., возникают и быстро развиваются неголономная механика и механика тела переменной массы. В XX в. возникает новая, релятивистская, механика, но затем оказывается, что существуют явления, которые и она не может пояснить. Как замечает Г. Бонди, «можно сказать, что существенным элементом прогресса в науке является доказательство несправедливости той или иной теории»¹. Действительно, каждый новый факт, противоречащий теории, не уничтожает ее, подобно тому, как релятивистская механика не уничтожила механику Ньютона: просто

¹ Бонди Г. Гипотезы и мифы в физической теории. М., «Мир», 1972, с. 10.

каждая из них уточнила поле своей деятельности. И так же как ньютоновская механика не исчерпала всей истины, не исчерпала ее и релятивистская, не исчерпают ее и последующие теории. Но каждая следующая приблизится к истине еще на один шаг.

Все шире делается диапазон исследований механики, она «выходит» в биологию, геологию, другие естественные науки, в искусство. За пределы механики вышла теория автоматического регулирования, начало которой было положено изучением движения центробежного регулятора — механизма с двумя степенями свободы. Перешагнула границы механики теория устойчивости движения: у нее оказались области применения в физике, астрономии, химии, биологии, она развилась в важную математическую теорию, все новые применения ее идей используются в технике. Важное прикладное значение имеют исследования механических систем, которые теряют устойчивость при определенных режимах. Речь идет об автоколебаниях, возникающих в процессе движения, например, во время полета самолета или раскачивания висючего моста под действием силы ветра. Соответствующие теории разрабатываются на стыке идей теории устойчивости, теории колебаний и неголономной механики: глубокого аналитического исследования механической неустойчивости пока еще нет.

Продолжается развитие теории колебаний, различные направления которой пересекаются едва ли не со всеми ветвями механики и, кроме того, входят в состав учения о теплоте, акустике, оптике, электротехнике, электронике, астрономии, математике. Влияние теории колебаний на становление и развитие разных идей механики непрерывно возрастает: изучение процессов без учета колебательных явлений зачастую оказывается невозможным.

Много задач стоит перед механикой машин. Важнейшая из них — проблема синтеза механизмов — по сути решена лишь для ограниченного числа частных случаев плоских шарнирных, зубчатых и кулачковых механизмов. В настоящее время все большее значение для различных областей машиностроения приобретают пространственные механизмы, теория синтеза которых практически еще не создана.

Как известно, автоматизация производственных процессов является одной из характерных черт современной

научно-технической революции. А между тем теория машин автоматического действия — это новое направление механики машин, перед которым стоит ряд важных и срочных задач: создание методов синтеза систем; разработка теории управления машинами-автоматами и методов синтеза систем преобразования, передачи и использования информации в машинах-автоматах; разработка принципиально новых способов обработки изделий и видов оборудования. Одной из важнейших задач является создание манипуляторов и роботов универсального и частного назначения, поскольку число производственных процессов, которые выполняются в среде, недоступной для человека, постоянно возрастает.

Одним из кардинальных вопросов механики (и теоретической физики) в наше время является теория гравитации. От нее ожидают важных результатов, возможно, потому, что о гравитации пока известно очень мало. Советский физик-теоретик А. З. Петров так сказал о внутреннем механизме этого явления: о нем не известно ничего, теория не поддается квантовому описанию, а главное — тяготение неуправляемо. Оно разрешает пользоваться собой, но не дает возможности творить себя в соответствии с нашими желаниями. Связано это с незаконченностью самой теории относительности.

Подобная принципиальная незавершенность свойственна всем без исключения направлениям механики. Не говоря уже о том, что они постоянно взаимодействуют друг с другом, взаимопроникая и исследовательскими методами, и рабочим аппаратом, и даже объектами изучения, далеки от завершения и «чистые» направления науки о движении.

* * *

Мы познакомились с историей механики и увидели, как постепенно развивались теоретические исследования в различных направлениях учения о движении и о силах, его производящих. Параллельно накапливали опыт практики, и их опыт весьма существенно помогал созданию теории. Начиная с XVII в. и теория помогает практике, сначала робко и неуверенно, затем, приблизительно с середины XIX столетия, уже в полную силу. В настоящее время механика — одна из важнейших наук, работающая в тесной связи с технической практикой. Сейчас затруд-

нительно перечислить все направления механики со всеми их пересечениями и оттенками, в особенности если мы вспомним, что из каждых 100 ученых, когда-либо живших на земле, 90 являются нашими современниками.

В конце XVIII в. казалось, что механика исчерпала свои возможности и что «Аналитическая механика» Лагранжа является сводом всего, что человечество может знать о движении и производящих его силах. Выяснилось, что дело обстоит не так: XIX век принес с собой прикладную механику, а XX еще более расширил диапазон исследования. Но и это не предел, ибо развитие человеческого знания идет по спирали, которая уходит в бесконечность.

СОДЕРЖАНИЕ

Возникновение механики	3
Теоретики и практики — схоласты и инженеры	22
Революция в науке	48
Революция в технике	67
От техники к науке	85
Наука на перепутье	108
Новые рубежи	126
От науки к технике	136
Что же дальше?	147