

Ф. Д. Бублейников



О ДВИЖЕНИИ

Детиз — 1956

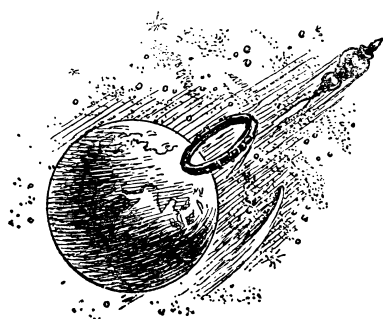


ШКОЛЬНАЯ БИБЛИОТЕКА

Ф. Д. Бублейников

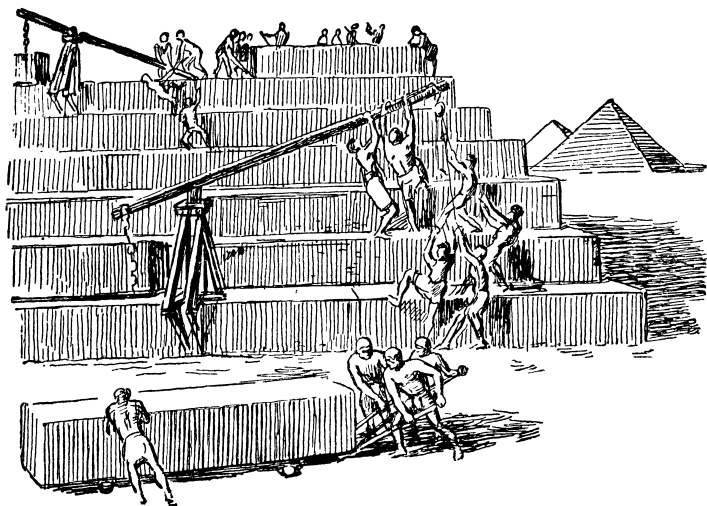
О ДВИЖЕНИИ

ИЗ ИСТОРИИ МЕХАНИКИ



Рисунки Л. Хорошкевича

Государственное Издательство Детской Литературы
Министерства Просвещения РСФСР
Москва 1956



Древние машины

Наше время — эпоха господства человека над природой. Паровозы влекут за собой десятки тяжело нагруженных вагонов. Морские суда перевозят на далекие расстояния сотни тысяч тонн товаров. Самолеты с огромной скоростью «перебрасывают» пассажиров.

Так, пользуясь знанием законов природы, удастся преодолевать с большой быстротой расстояния и перемещать огромные тяжести.

Но и в далеком прошлом, за тысячи лет до наших дней, техника культурных народов уже достигла больших успехов. Древние вавилоняне и египтяне возводили дворцы, храмы и грандиозные царские усыпальницы-пирамиды, которые сделали бы честь и современной технике.

В огромном храме бога Амона в древних Фивах потолок главного зала поддерживался 134 массивными колоннами, высотой от 14 до 24 метров.

На границе песчаной пустыни в Египте высится ступенчатая пирамида Хеопса высотой 146 метров. Она построена из плит весом по 2,5 тонны каждая. У входа в эту усыпальницу возведено сооружение из отесанных глыб длиной до 5,5 метра и весом до 42 тонн.

Очевидно, что рабочие, возводившие подобные сооружения, не могли поднимать на высоту такие плиты и глыбы без механических приспособлений.

Живший значительно позднее греческий историк Геродот (около середины V века до н. э.) так описал сооружение пирамиды Хеопса: «Эта пирамида была сделана уступами, которые шли вверх наподобие ступеней; одни называли эти уступы «лестницей», другие — «столиками». Сделав первые уступы, подымали потом на них камни вверх помощью некоторых машин, сделанных из коротких брусьев. Потом на другую ступень подымался камень другой машиной и так далее».

Легко догадаться, что эти машины были просто рычагами с точкой опоры на крепком станке. С конца короткого плеча рычага свешивалась цепь, обвивавшая плиту. При помощи двух таких устройств можно было поднять плиту на высоту ступени пирамиды.

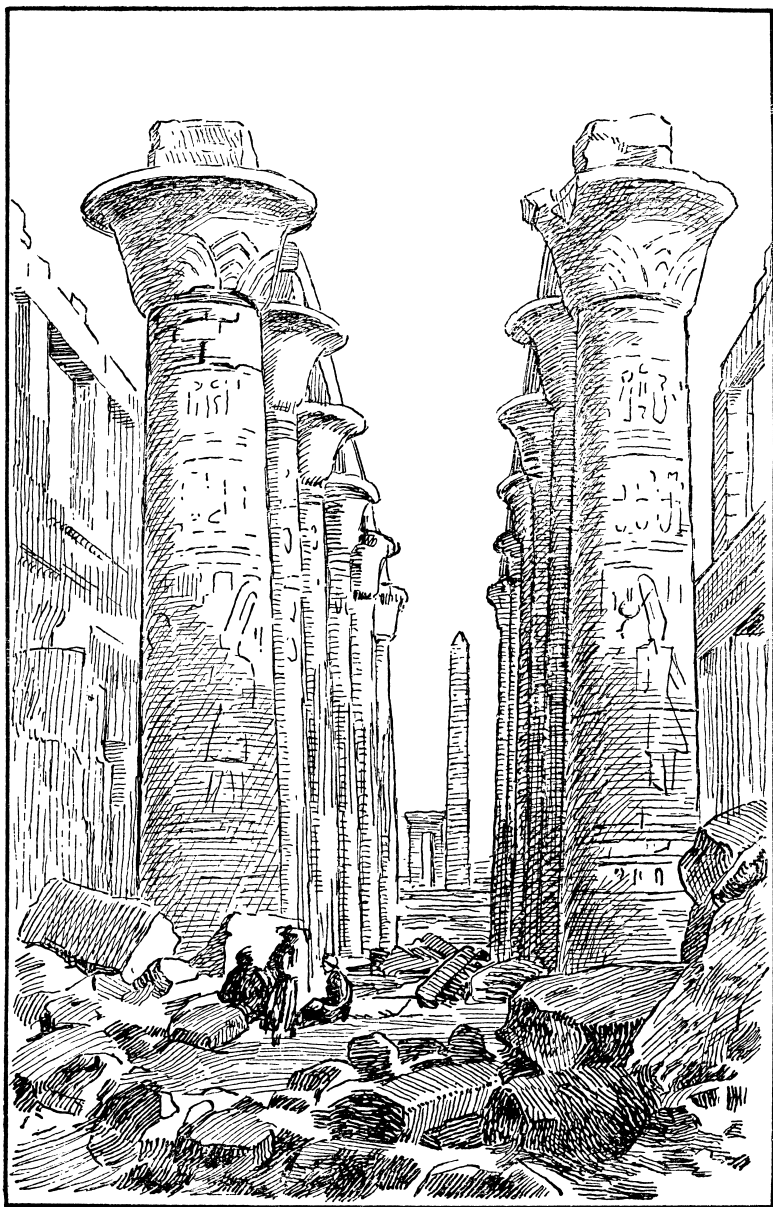
Более удивительно, каким образом могли древние египтяне доставлять и устанавливать у входа в храмы массивные колонны-обелиски, высотой 30—40 метров и весом до 300—400 тонн. Решить эту инженерную задачу было возможно, только пользуясь блоками.

Что древним египтянам они были знакомы, доказывает находка деревянного блока, хранящегося теперь в Лондонском музее.

Значит, нет сомнения в том, что египетские и вавилонские строители хорошо знали, как применять рычаги, блоки и наклонную плоскость. Но были ли известны им механические принципы равновесия простых машин?

На этот вопрос еще не найден ответ ни в покрытых иероглифами египетских папирусах, ни на глиняных дощечках, заменявших в древнем Вавилоне книги и найденных в развалинах древних городов.

Никакие расчеты употреблявшихся египтянами простых машин, конечно, не были возможны без знания геометрии и арифметики. Но в этих науках вавилоняне и египтяне сделали значительные успехи еще за две тысячи лет до н. э.



Колонны древнего египетского храма в Фивах.

Строительство больших зданий, орошение полей, выделение земельных участков требовали математического решения различных практических задач.

Клинообразные вавилонские письма и египетские иероглифы дали возможность современным ученым познакомиться с тем, как справлялись с этими задачами древние математики.

Найдены даже руководства по арифметике и геометрии. Одно из них составлено писцом фараона Ахмесом в начале второго тысячелетия до н. э. Другое такое руководство — «Математический папирус» — хранится в Москве.

Египетские математики уже употребляли для указания арифметических действий вместо слов особые знаки: шагающие ноги в зависимости от направления шага указывали на сложение и вычитание; имелись знаки равенства и корня. Особыми знаками обозначались 1, 10, 100, 1000, 10 000 и 100 000. Имелось представление даже о миллионе, который обозначался фигуркой человека, поднявшего руки в знак удивления.

В руководстве Ахмеса даны решения различных вопросов, возникавших в практике земледельца, строителя, торговца.

Например, предлагалось разделить 700 хлебов между 4 лицами так, чтобы полученные ими количества относились как $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ и $\frac{1}{4}$ (ее легко решить, составив уравнение $\frac{2}{3}x + \frac{1}{2}x + \frac{1}{3}x + \frac{1}{4}x = 700$, которому удовлетворяет корень $x = 400$).

Там же решались вопросы, требовавшие и геометрических знаний. Например, вычислялась площадь полей, имевших форму многоугольника.

У древних египтян математикой занимались писцы. Они старались придать своим знаниям таинственный, магический характер, чтобы сделать их понятными только посвященным.

Папирус Ахмеса носил заголовок: «Руководство к достижению познания всех темных вещей и тайн, содержащихся в предметах».

Однако благодаря торговле, которую вели вавилонские, египетские и индийские купцы, математические, астрономические и механические познания распространя-

лись. Они были усвоены и древними греками, игравшими видную роль среди культурных народов древности уже в VIII—VI веках до н. э.

Родовой общинный быт греческих племен сменялся тогда рабовладельческим. По сравнению с прежним, это было прогрессом в жизни греческого общества. Появилось много промышленных предприятий, на которых работали рабы. Возникла оживленная торговля, началось строение морских судов, бороздивших Средиземное море во всех направлениях.

В греческих городах сооружались прекрасные каменные храмы и общественные здания. Для постройки их были необходимы подъемные машины.

Греческие строители знакомились с техникой народов Востока и применяли ее у себя на родине. Постройка греческих храмов и театров не представляла таких затруднений, как сооружение пирамид или установка обелисков. Поэтому древние греки могли довольствоваться строительной техникой египтян.

Но в судостроении и военном деле скоро возникли новые задачи.

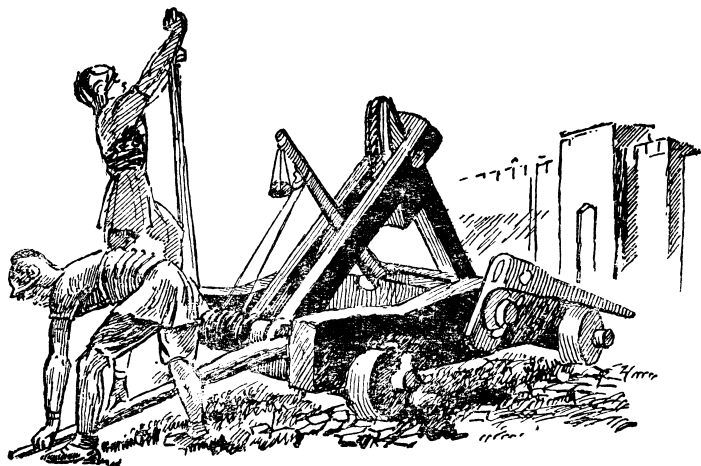
Древние греки были смелыми мореплавателями.

Поэма древнегреческого поэта Гомера «Одиссея» повествует о морском путешествии ее героя, длившемся двадцать лет. Греки заплывали через нынешние Дарданелльский и Босфорский проливы в Черное море. Оттуда через Маныч, соединявший тогда Азовское и Каспийское моря, их суда проплывали в «Пруд Солнца», как греки называли Каспий.

Морские суда греков ходили под парусами, а в тихую погоду — на веслах. На них устанавливалось по одной, по две и даже по три мачты, которыми служили длинные, тяжелые бревна.

Кроме торговых судов, у греков были и военные корабли. Особенно больших размеров они достигли в эпоху развития военного флота, после смерти Александра Македонского (356—323 до н. э.).

С IV века до н. э. в греческих и позднее — в римских войсках появились военные метательные машины. Самой простой из них был онагр, метавший на сотни метров тяжелые каменные ядра. Ядро бросалось подобно тому, как древний пращик швырял камень. Только вместо руки взмах производил деревянный рычаг с веревочной петлей



Онагр.

на конце, в которую закладывалось ядро. А силу мышц руки заменяла упругость закручиваемой тетивы.

Имелись катапульты, метавшие стрелы и копья, полет которых направлялся жолобом, позволявшим вести прицельный обстрел. Искусные наводчики попадали на расстоянии ста шагов в отдельного воина, а на двести шагов — в небольшую их группу.

Камнеметами разбивали деревянные прикрытия, сооружавшиеся для защиты воинов, осаждавших города, и причиняли повреждения кораблям. Известен даже случай, когда восьмидневным обстрелом из камнеметов была разрушена наскоро построенная стена.

Для разрушения крепостных стен устраивали таран: горизонтально подвешенное тяжелое бревно с бронзовым наконечником. Стоя под прикрытием, воины раскачивали таран, нанося им удары в стену. Так постепенно разрушалась часть стены, и через пролом в крепость проникали осаждавшие ее войска.

Это было мощное разрушительное орудие древнегреческой техники. Перед ним не могли устоять никакие стены. Рассказывая об осаде одной римской крепости карфагенским полководцем Ганнибалом, историк Ливий (I век до н. э. — I век. н. э.) писал: «И вот уже громились тара-

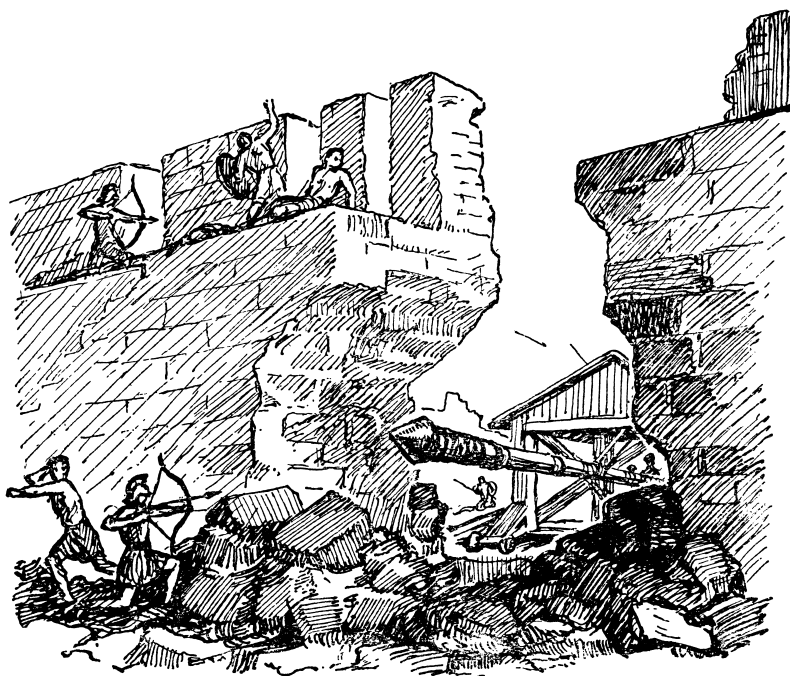
ном стены, и многие части их были поколеблены, в одном месте сплошные разрушения обнажили город: три башни подряд со всей находящейся между ними стеной рухнули, издавая оглушительный грохот...»

Как ни разнообразны практические цели применения рычагов, блоков и других машин, но с механической точки зрения у них одна задача — приводить в движение физические тела.

Поэтому в результате изучения действия механизмов и возникла наука о движении тел — механика.

Что такое движение

Наблюдая поднятие больших тяжестей рычагами и блоками, строители не видели в движении этих грузов ничего загадочного. Едва ли и военные техники, бросая при



Ударами тарана осаждающие разрушали крепостные стены.

помощи онагров каменные ядра, задумывались над вопросом: что такое движение?

Полет камня, копий и стрел, метавшихся военными машинами, был для них понятным явлением.

Быть может, если бы древние техники взялись за изучение условий равновесия машин и траектории брошенного каменного ядра, они бы заложили основы механики. Но, довольствуясь практическими знаниями механизмов, они не занимались теоретическими исследованиями.

Когда же изучением природы заинтересовались греческие философы, то они расширили проблемы механики, придав ей философский характер.

Греческие философы были естествоиспытателями-энциклопедистами. Они хотели сразу охватить в одном учении всю природу как единое целое.

Философ-материалист Гераклит из Эфеса (около 530—470 до н. э.) указывал, что в природе «все течет, все постоянно изменяется, все находится в постоянном процессе возникновения и исчезновения».

Этот процесс изменения тел природы греческие философы и называли «движением».

Наиболее последовательно учение о движении изложил философ Аристотель (384—322 до н. э.).

Сын врача при дворе македонского царя, Аристотель получил хорошее образование. Он очень увлекался естествознанием и поступил в «Академию» философа Платона в Афинах, где пробыл до смерти Платона (в 347 году). В течение этого времени он не только изучал сочинения своего учителя, но и самостоятельно разрабатывал философские вопросы.

В 343 году Аристотель принял приглашение македонского царя Филиппа II быть воспитателем его тринадцатилетнего сына Александра.

Когда воспитанник Аристотеля — Александр Македонский — стал главой большого государства, он предпринял далекие походы — в Среднюю Азию, в Индию, в Египет. Советы философа-воспитателя были уже ему не нужны.

Тогда Аристотель возвратился в Афины. Там он основал свою философскую школу, приспособив для учебных целей одно из общественных зданий — Ликей. Туда съезжались к нему юноши из всех государств Греции, из Италии, Македонии и других культурных стран.

Прогуливаясь с учениками по аллеям парка, примыкавшего к Ликею, Аристотель беседовал с ними, излагая свои философские взгляды.

Аристотель оставил много сочинений. Вопросы механики были рассмотрены им в книгах «Физика» и «О небе».

Как и другие философы, Аристотель понимал под движением любое изменение тела: превращение воды в лед или в пар, созревание и высыхание плода на дереве, заболевание и выздоравливание... Он стремился объединить все эти разнородные явления в едином понятии. Размышляя о перемещении одного тела относительно другого, как понимается в современной механике движение, Аристотель задумывался вот над чем: что происходит с телом, когда оно перемещается из одного места в другое? И он решил, что тело в первом месте исчезает, перестает существовать, а во втором — вновь возникает.

Аристотель размышлял над тем, «что», в «чем» и «когда» движется, то-есть что такое материя (вещество), пространство и время. Он утверждал, что пространство заполнено материей, так как «природа боится пустоты».

Движение в заполненном пространстве возможно потому, что «тела могут уступать друг другу место», — доказательством чего служит водоворот в реке: частицы воды заполняют все русло, что не мешает их вихреобразному движению.

Но не все философы соглашались в этом вопросе с Аристотелем.

Противниками учения о сплошном строении материи были последователи жившего несколько ранее философа Демокрита (460—370 до н. э.).

Демокрит, сын богатого купца, обладал большими средствами. Он много путешествовал по культурным странам древнего Востока: Индии, Вавилонии, Египту. Там Демокрит познакомился с астрономией и математикой вавилонских и египетских жрецов.

Этот философ учил, что материя состоит из мельчайших неделимых частиц — атомов.

Доказательство правильности такого представления атомисты видели, например, в распространении запахов: очевидно, что от пахучего вещества отделяются мельчайшие частицы, производящие на орган обоняния впечатление запаха.

Маленький кусочек краски, растворяясь в большом количестве воды, также дает пример разделения вещества на мельчайшие частицы. Пар над кипящей водой, по мнению атомистов, образуется атомами, выделяющимися из ее массы.

Но атомы неделимы. Между ними — пустое пространство. По учению Демокрита, атомы находятся в постоянном движении с различной скоростью и во всевозможных направлениях. Этим и объясняются все явления природы.

Обладая значительными математическими познаниями, греческие философы не применяли их к механике. Они считали единственно правильным методом познания природы логические выводы из умозрительных положений (аксиом).

Размышляя над движением тел, философы не интересовались тем, каковы его причины. Они не стремились найти зависимость между пройденным пространством и промежутком времени, в течение которого длится движение.

Современная же механика изучает количественные законы движения. Для этого необходимы наблюдения и опыты.

Греческие философы, как члены правящего класса рабовладельческого общества, пренебрегали опытами: ведь опыт так близок к ремеслу и презиравшемуся ими физическому труду.

Правда, Аристотель говорил, что природу должно изучать путем наблюдения и опыта, но сам мало пользовался этим методом.

Рассуждения философов о «сущности» движения не имели практического значения. Они не могли помочь рассчитать механизм или предсказать траекторию полета каменного ядра, выброшенного онагром. Поэтому техники были вынуждены руководствоваться чисто опытными — эмпирическими — знаниями, усвоенными ими из практики.

Догонит ли Ахиллес черепаху?

Древние философы пренебрегали опытом. Только разум человека и его логика казались им надежным средством познания природы.

Поэтому нередко они сталкивались с «неразрешимы-



Догонит ли Ахиллес черепаху?

ми» загадками. Особенную известность приобрели в древности так называемые «апории» философа Зенона (V век до н. э.). Остановимся лишь на двух из них.

Зенон доказывал, будто прославленный поэтом Гомером греческий герой, «быстроногий» Ахиллес, не может догнать черепаху.

Этот философ, конечно, знал, что во время осады Трои Ахиллес часто догонял убежавших от него троянцев. Да и сам он видел, как на улицах города, где он жил, одни пешеходы перегоняют других.

Но Зенон не придавал решающего значения наблюдению и опыту. Поэтому он и утверждал, будто Ахиллес не может догнать черепаху.

Зенон рассуждал строго логически: пока Ахиллес пробежит расстояние до того места, где находится черепаха, она проползет некоторое, хотя и небольшое, пространство; в то время как Ахиллес преодолеет и это расстояние, черепаха опять отползет немного, и так будто бы будет продолжаться вечно. Следовательно, делал вывод Зенон, Ахиллес никогда не догонит черепаху.

«Загадка» Зенона привлекла большое внимание не только философов, но и математиков. Всех удивляло, что рассуждение с логической точки зрения правильно, а приводит к явно нелепому заключению.

Однако эту задачу нетрудно разрешить: стоит только ввести понятие о скорости движения и применить арифметику.

Предположим, что Ахиллес пробегает в секунду V метров, а черепаха проползает v метров. Их разделяет расстояние l метров. Через каждую секунду Ахиллес приближается к черепахе на $V - v$ метров. Значит, через $\frac{l}{V - v}$ секунд он догонит ее.

Ошибочность вывода Зенона тем и объясняется, что этот философ ни с опытом не посчитался, ни математику не применил для разрешения своей апории.

Апория об Ахиллесе и черепахе доказывает, что Зенон не отрицал чувственного восприятия движения. Ведь Ахиллес бежит, а черепаха ползет — значит, оба движутся. Но Зенон заявлял, что движение — кажущееся явление. В действительности же, как доказывал он, оно не существует.

В этом и заключается его апория о летящей стреле: полет стрелы, по мнению Зенона, — только иллюзия наших чувств; на самом деле летящая стрела находится в покое.

Вот как рассуждал Зенон: в каждый данный момент стрела может находиться только в одном месте, но ни перед ним, ни за ним; значит, в каждый момент стрела покоится. А из множества моментов состояния покоя не может составиться движение.

Однако возникают вопросы: почему же мы отличаем состояние стрелы, выпущенной из лука, от состояния упавшей стрелы? Ведь обе они «покоятся». И почему «покоющаяся» летящая стрела пробивает грудь воина, а покоящаяся на земле не угрожает ему?

Ответ на все эти вопросы с точки зрения Зенона один: свидетельства наших чувств обманчивы, они не соответствуют тому, что существует в действительности.

Конечно, это неверно. Наши чувства дают нам сигналы о действительно происходящих явлениях.

Слух воспринимает колебания воздуха как звук. Но эти колебания существуют. Их можно записать на грампластинке.

Воспринимая глазом световые волны, отразившиеся от поверхности физического тела, мы получаем представление о действительно существующем предмете.

Если бы наши ощущения не отражали действительно существующего мира, то не могло бы быть науки о природе.

На самом деле природа и ее силы существуют независимо от нашего сознания. А главнейшая цель науки — познание сил природы.

Механика древних философов

В трудах философов древней Греции механика получила наибольшее развитие у Аристотеля.

Хотя этот философ и считал необходимыми для изучения механики опыт и наблюдение, но его учение о движении тел нередко противоречило фактам.

По его мнению, чем тяжелее тело, тем оно падает быстрее. Например, большой камень, как думал Аристотель, упадет скорее на землю, чем маленький, сброшенный с той же высоты.

Почему же Аристотель пришел к такому выводу? Быть может, потому, что оторвавшийся древесный лист падает гораздо медленнее, чем яблоко? Но это было бы слишком поверхностным наблюдением. Ведь Аристотелю было известно сопротивление воздуха, которое должно больше задерживать падение легкого листа, чем тяжелого яблока.

Более вероятно, что Аристотель умозрительно сделал этот вывод: на то тело, которое тяжелее, действует большая сила, влекущая его к земле, следовательно, оно должно падать с большей скоростью, чем легкое.

Если бы Аристотель прибег к простейшему опыту, он не сделал бы такого неправильного вывода. Стоило ему подняться на любую башню или на крышу дома и уронить одновременно сразу два камня разной величины, чтобы убедиться в своей ошибке.

Только опыт мог указать тогда на независимость скорости падения тела от его веса. Объяснить это явление стало возможным лишь после установления закона всемирного тяготения.

Сила, сообщающая ускорение свободно падающему телу, пропорциональна массе. Поэтому на каждую единицу массы, независимо от веса тела, действует одинаковая сила, сообщающая ей одно и то же ускорение.

Даже Галилей не мог бы сделать такое умозаключение.

Опыт был совершенно необходим, чтобы установить, что как легкое, так и тяжелое тело должно падать с одинаковой скоростью.

Аристотель знал, что свободно падающее тело движется ускоренно, но он не пытался объяснить причину этого явления. А между тем оно должно было навести его на мысль об инерции движения.

Ускорение падения можно было объяснить чисто умозрительно двумя причинами: во-первых, что сила тяжести, влекущая тело к земной поверхности, по мере движения быстро возрастает; во-вторых, что сообщенная телу скорость движения сохраняется и в каждый момент к ней прибавляется скорость, сообщаемая непрерывно действующей силой тяжести.

Первое предположение не подтвердилось бы опытом того времени: тело, взвешенное на вершине башни, весило бы столько же, как и у ее подножия. Следовательно, сила тяжести в этих пределах высот постоянна.

Между тем второе предположение находило подтверждение в ежедневном опыте.

Например, каменное ядро, выброшенное метательной машиной, сохраняло сообщенное ему движение и летело очень далеко. Его останавливало только падение на земную поверхность.

Лодка также продолжала свое движение, хотя гребцы вблизи берега поднимали весла. Она останавливалась, лишь ударившись носом о берег.

Из этих наблюдений трудно сделать другой вывод, кроме того, что тела сохраняют свое движение. Но Аристотель его не сделал. Напротив, он всю силу своего ума направил на то, чтобы объяснить эти явления с точки зрения своего ошибочного учения.

Аристотель утверждал, будто тело движется только до тех пор, пока на него действует сила. И если величина этой силы постоянна, то движение тела равномерно. Ошибка Аристотеля проистекала из поверхностного наблюдения: например, для движения колесницы нужно постоянное усилие лошади. Аристотель не понял, что колесница встречает постоянное сопротивление в трении колес о дорогу и осей во втулках колес, преодолеваемое силой лошади. Если бы он обратил больше внимания на то, что и летящий камень и плывущая лодка сохраняют свое движение, он открыл бы инерцию движущихся тел.

А зная, что движущиеся тела не останавливаются сами собой, он понял бы, что постоянно действующая сила сообщает ускоренное движение. Тогда стало бы понятно, почему ускоренно движется и свободно падающее тело, находящееся под постоянным действием силы тяжести.

Исходя из своего неверного положения о движении тел, Аристотель объяснял движение брошенного камня так: воздух, врываясь в пустоту, образующуюся позади камня, подталкивает его; если бы не было этого, то камень, брошенный онагром, немедленно упал бы возле машины.

Механика — наука о количественных соотношениях между силой, скоростью движения, временем и пройденным расстоянием. Но Аристотель редко занимался поисками этих отношений. Во всей «Физике» лишь один раз он попытался сформулировать закон, похожий на законы современной механики. Именно в конце VII главы он писал: «если α будет движущее, β — движимое, γ — длина, на которую оно продвинуто, δ — время, в течение которого оно двигалось; тогда в равное время сила, равная α , продвинет половину β на двойную длину γ , а на целое γ в половину времени δ : такова будет пропорция. И если одна и та же сила движет одно и то же тело в определенное время на определенную длину, а половину в половинное время, то половинная сила продвинет половину движимого тела в то же время на равную длину».

Правда, Аристотель имел некоторое представление об инерции тел, но он был далек от современного понятия об этом свойстве тел.

«Однако, — писал он, — не следует думать, что если α продвигает тело β на величину γ во время δ , то сила ϵ , равная половине α , продвинет тело. Это может оказаться неверным, ибо эта половинная сила, может быть, даже не будет в состоянии заставить β пройти какую-либо часть γ ; так, например, если необходима полная сила для продвижения какого-либо груза, то половинная не сможет произвести никакого движения ни в какой промежуток времени, ибо иначе было бы достаточно одного матроса, чтобы привести в движение корабль».

Это рассуждение доказывает, как было чуждо Аристотелю современное понимание инерции.

Как известно, любая сила сообщает произвольно большой массе свободного (незакрепленного) тела некоторое ускорение.

Например, Земля сообщает оторвавшемуся яблоку ускорение, равное 981 сантиметру в секунду за каждую секунду. Яблоко действует на Землю с той же силой. Но сообщаемое им ускорение во столько раз меньше, во сколько масса Земли больше массы яблока.

Это представление было введено в механику только Ньютоном.

Оставив без внимания количественные законы движения, Аристотель отдал много труда чисто словесным качественным определениям, не имевшим физического смысла.

Одни движения он считал «естественными», другие — «насильственными», одни — «совершенными», другие — «несовершенными». И, основываясь на этих определениях, он делал свои выводы.

Вот как наш известный ученый-академик А. И. Крылов (1863—1945) оценил значение «Физики» Аристотеля в истории механики: «По теперешней терминологии это сочинение относится к области чистой философии, а не к той группе знаний, которую мы теперь называем физикой, хотя значительная часть этого сочинения и посвящена учению о движении, но с иной точки зрения, нежели это явление рассматривается в теперешней физике и механике. Теперешняя физика и механика, основанные во многом на опыте и наблюдении, так же мало удовлетворяли бы склонность ума древних греков к точным отвлеченным рассуждениям, как эти рассуждения, представляющиеся нам во многом не относящимися к естествознанию, мало удовлетворяют нас».

Даже в тех случаях, когда древние философы делали правильный вывод, они прибегали к умозрительным, часто странным объяснениям причины наблюдаемого явления.

О взглядах Аристотеля на причину, например, выигрыша в силе при употреблении рычага мы узнаем из сочинения «Проблемы механики», написанного одним из его учеников. В этом сочинении рассмотрены колесо, руль, клещи, весло и другие орудия, применявшиеся в древности.

Объяснить действие рычага казалось древним философам труднейшей проблемой; они не удовлетворялись знанием обратной пропорциональности груза и приложенной силы плечам рычага, а хотели знать «причину» этой зависимости.

Правда, автор «Проблем механики», говоря о действии

рычага, упоминал, что «тела, у которых произведения весов на скорость равны, обнаруживают равное действие» и что «сила, приложенная на большем расстоянии от точки опоры, легче двигает груз, так как она описывает больший круг». Но объяснял он эти правильные положения какими-то «загадочными» свойствами круга, пускаясь в рассуждения, очень далекие от современной механики.

Концы рычага при движении описывают дуги круга. Свойствами круга и объясняется действие рычага. Таково мнение автора «Проблем механики». Но окружность, как ему кажется, — очень загадочная кривая линия.

«Нет ничего странного в том, — говорит он, — что из удивительного проистекает нечто удивительное. Но самое удивительное есть соединение в одном противоположных свойств. А круг есть действительно соединение таковых».

Автору кажется удивительным, что окружность одновременно выпукла и вогнута, что точка на окружности, движущаяся вперед, одновременно движется и назад.

Если, однако, оставить без внимания эти рассуждения, то можно признать, что закон рычага уже был известен во времена Аристотеля. Правда, не в той четкой форме, какая была ему дана позднее Архимедом.

Конечно, свойства рычага были хорошо изучены техниками, применявшими его для поднятия тяжестей. Филосо-



Носильщики переносят груз на шесте.

фам принадлежит только попытка «объяснить» эти свойства.

В «Проблемах механики» рассмотрено много случаев приложения закона рычага. Например, когда два человека несут груз на шесте, положив к себе на плечи его концы.

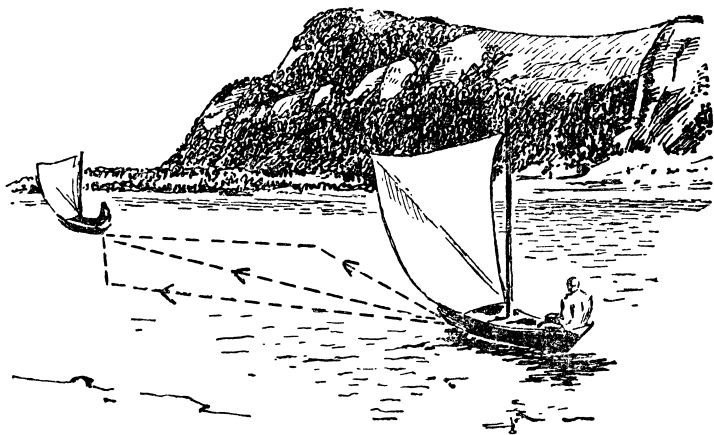
«Почему, — спрашивает автор, — груз сильнее давит на того, к кому он ближе?» Ответ таков: «Шест является здесь рычагом. Ближайший к грузу носильщик есть движимое, другой носильщик — движущее, и чем дальше последний удален от груза, тем легче он движет».

Это сравнение не вполне ясно. Но оно свидетельствует о знании обратной пропорциональности уравнивающих грузов плечам рычага.

В действительности давление груза разлагается на две силы, приложенные к плечам носильщиков. Эти силы, в сумме равные грузу, по величине обратно пропорциональны расстояниям его от концов шеста.

В «Проблемах механики» уже был решен один из важнейших вопросов науки о движении тел: как будет двигаться тело, которому сообщено движение одновременно по двум направлениям?

«Если что-нибудь, — говорит автор, — движется в каком-нибудь отношении так, что оно должно пройти по од-



Лодка, идущая под парусом поперек реки, сносится течением. В результате она движется по диагонали параллелограмма, построенного на скоростях в этих направлениях.

ной линии, то эта прямая будет диагональю фигуры, которая определяется слагаемыми в данном отношении линиями».

Пусть, например, гребец направляет лодку наискось поперек течения, которое, в свою очередь, уносит лодку. В каждом из этих направлений движение происходит одновременно.

В результате лодка будет двигаться по диагонали параллелограмма, сторонами которого служат пройденные ею расстояния в каждом из направлений. А стороны этого параллелограмма относятся друг к другу, как скорости движения лодки под ударами весел и течения реки.

Пользуясь этим правилом, автор сочинения рассматривает движение по кругу как результат сложения одновременных движений к центру круга и по касательной к нему. Такое представление было большим шагом вперед в науке о движении тел.

Положим, что нужно изучить вращательное движение гири на шнурке вокруг руки.

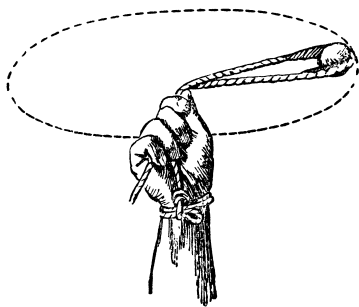
В каждый момент можно считать, что она движется по двум направлениям: во-первых, по касательной к кругу, то-есть по направлению перпендикуляра к шнурку; во-вторых, по направлению к центру круга — к руке, держащей конец шнурка.

Значит, в течение очень короткого времени гирька перемещается по диагонали параллелограмма этих двух движений. Из сложения очень большого числа таких перемещений и складается криволинейное движение гири.

Наконец, от внимания древних механиков не ускользнуло, что удар действует гораздо сильнее, чем давление.

Ударяя, например, молотком по вертикальному клину, можно вогнать его в раскалываемое бревно. Но сколько бы ни лежал этот молоток сверху клина, он не произведет никакого заметного действия.

Объяснение разницы между ударом и давлением, ко-



Пращник сообщает камню круговое движение. Когда он выпускает из рук один конец веревки, то камень летит по касательной к описываемому им кругу.

нечно, намного превышало механические познания древних ученых. Оно стало возможным только через два тысячелетия — после глубоких исследований голландского математика Гюйгенса.

Закон рычага, параллелограмм скоростей и представление о круговом движении как получающемся из сложения прямолинейных движений — вот то положительное, что дал Аристотель для механики. Дальнейшее ее развитие в античное время зависело от применения к ней математики.

Возникновение математики у греков

Первые попытки приложения математики к механике были сделаны еще Аристотелем и его ближайшими последователями. В «Проблемах механики» впервые встречаются чертежи и буквенные обозначения величин. Но математические познания древних греков были гораздо значительнее, чем примененные философами в механике.

Греческая математика возникла не на «пустом месте». Египтяне и вавилоняне значительно ранее древних греков обладали большими по тому времени математическими познаниями. Находясь в постоянных сношениях с этими народами, греки могли пользоваться уже имевшимися знаниями и развивать их дальше.

Одновременно возникла математика и у индийцев. После похода Александра Македонского в Индию на границе этой страны были основаны небольшие греческие государства. Через их посредство Греция поддерживала торговые отношения и обмен знаниями с народами Индии.

Еще в IV веке до н. э. строителям жертвенников в Индии были известны свойства катетов и гипотенузы прямоугольного треугольника. Индийцы сформулировали их в следующем выражении: «Диагональ прямоугольника производит то, что производят отдельно длинная и короткая стороны прямоугольника», то-есть им была известна теорема Пифагора.

Позднее именно индийцы придумали знаки для обозначения чисел и нуля, которые были заимствованы у них арабами, а от них перешли как «арабские» в Европу. Индийцам принадлежит и честь изобретения «позиционной» системы написания чисел: в ней каждая цифра обозначает десятки, сотни и так далее, в зависимости от места.

В V—VI веках н. э. дроби изображались индийцами так же, как и теперь: сверху — числитель, внизу — знаменатель; только они не были разделены чертой.

Математики Индии уже противопоставляли положительным величинам отрицательные, над которыми для отличия ставилась точка. Они признавали отрицательные корни уравнений, считавшиеся недопустимыми даже в III—IV веках знаменитым греческим математиком Диофантом.

Положительным количествам, «имуществу», они противопоставляли отрицательные — «долг».

Задачи индийских математиков большей частью имели необычайную для нас форму. Вот, например, одна из них: «Из пчелиного роя $\frac{1}{4}$ опустилась на один цветок, а $\frac{2}{3}$ полетело на другой цветок. Одна пчела, равно привлекаемая сладостным благоуханием обоих цветков, жужжит в воздухе. Скажи мне, прелестная женщина, сколько было всего пчел?»

Решение этих задач требовало знания уравнений как первой степени, так и квадратных, которые уже были известны индийцам.

Греческие философы поняли практическое значение математики, как только познакомились с геометрией в Египте.

Философ Фалес (конец VII — начало VI века до н. э.) и его ученик Анаксимандр (около 610—546 до н. э.) уже применяли свои геометрические познания к решению астрономических задач.

Первые греческие математики обладали лишь элементарными познаниями. Фалесу были известны свойства равнобедренного треугольника, равенство вертикальных углов (то-есть образованных пересечением двух линий и лежащих друг против друга), деление на две равные части круга его диаметром. Эти знания он заимствовал у египетских жрецов.

«Побывав в Египте, — гласит старинное греческое предание, — Фалес привез в Элладу геометрию. Многое он открыл сам, зачатки многого передал своим преемникам». Но, заимствовав математические познания у египтян и вавилонян, греки стремились развить их, привести в систему и лишить ореола таинственности.

Совсем иное направление дал математике один из уче-

ников Фалеса, прославленный Пифагор (около 580—500 до н. э.).

Пифагор долгое время прожил в Египте и путешествовал по Вавилонии. Общаясь с жрецами этих стран, он заимствовал от них не только познания в геометрии и арифметике. Его заинтересовала также магия — «колдовское» искусство, тесно связанное с религиозными предрассудками. Он увлекался и астрологией — ложной наукой предсказания будущего по положению на небесной сфере светил.

Пифагор поддался влиянию мистицизма жрецов, наложившего отпечаток на его философское учение. Даже математика в его изложении имела мистический характер.

Числа, обозначающие лишь величину или количество, получили в глазах пифагорейцев какое-то особенное значение. В них видели «начало» всех вещей природы, которое было предметом поисков греческих философов. Им приписывалось «совершенство» и «несовершенство» и другие качества, свойственные телам природы. Число 6 считалось пифагорейцами воплощением оживления, 7 — здоровья, 8 — дружбы, и так далее.

Пифагорейская мистика чисел в течение ряда веков действовала на воображение ученых Европы.

Предание связало с именем Пифагора известную теорему о равенстве площади квадрата, построенного на гипотенузе, сумме площадей квадратов, построенных на катетах прямоугольного треугольника.

Письменного доказательства открытия этой теоремы Пифагором не осталось. Но вероятно, что он первый сформулировал в виде теоремы эмпирический вывод из практики кровельщиков, плотников, строителей и «натягивателей веревок» — землемеров.

Каждый кровельщик, конечно, знал, что квадраты, построенные на катетах прямоугольного треугольника, содержат вместе столько черепиц, сколько их укладывается в квадрате, построенном на гипотенузе. Оставалось выразить это знание в терминах геометрии, чтобы «открыть» теорему Пифагора.

Вот почему эта теорема в греческой геометрии носила название «моста ослов», то-есть истины, известной всем, кроме невежд.

В механике Пифагору принадлежит открытие, что гармонические звуки издаются струнами, длины которых на-

ходятся в простом числовом отношении. Пифагорейцы установили, что одинаково натянутые струны равной толщины, если их длины относятся как 1:2, 2:4, 3:4, 4:5, дают консонирующие звуки¹.

Но пифагорейцы приписали гармоничность сочетаний этих звуков числам, выражающим отношение между длинами струн. Подобную же «гармонию» они стали искать и во всех других явлениях природы.

Математика древних греков получила наибольшее развитие в александрийский период.

Александрия — мировой коммерческий порт античного времени — была основана Александром Македонским у устья Нила в 30-х годах IV века до н. э.

После смерти Александра Македонского в 323 году до н. э. Египтом правил Птолемей, сын Лага (Птолемей I Сотер). Он привлекал в Александрию ученых, писателей, архитекторов, инженеров. В начале III века до н. э. была основана Александрийская академия. Для этого учреждения воздвигли великолепное здание с аудиториями, рабочими комнатами и жилыми помещениями для ученых. При академии несколько позднее была собрана богатейшая библиотека, в которой хранились подлинники сочинений философов, математиков, астрономов и других ученых. Владельцам этих подлинников оставлялись только копии.

В эпоху расцвета научной деятельности Александрийской академии в ее библиотеке находилось четыреста тысяч пергаментных свитков и папирусов. Кроме того, триста тысяч свитков хранилось в храме Юпитера.

Александрия стала не только центром промышленности, но и средоточием научной деятельности и художественного творчества.

Науки, возникшие из потребностей практики, получили в трудах греческих ученых теоретическое завершение.

Астрономия на Востоке не имела других целей, кроме установления календарных дат и предсказания затмений. В Греции она стала наукой о строении вселенной.

Геометрия, бывшая в Египте, Вавилонии и Индии искусством землемеров и строителей храмов, была поднята александрийскими учеными на уровень математической теории.

¹ Консолирующими звуками называются такие, сочетание которых дает согласное звучание (благозвучие).

Из греческих математиков раннего александрийского периода наибольшую известность получил Евклид, живший в конце IV и начале III века до н. э. Он оставил свои знаменитые «Начала» — сочинение по геометрии, в котором были исследованы свойства треугольника, параллелограммов, многоугольников, дано понятие о цилиндре, конусе и шаре. Евклид был занят задачей построения квадрата, площадь которого была бы равна площади треугольника, параллелограмма, многоугольника. Он вычислял объемы геометрических тел.

Но вычисление площади круга, поверхности и объема цилиндра и шара было еще не решенной проблемой для Евклида.

В «Началах» Евклида геометрия впервые была приведена в стройную систему. Это сочинение служит образцом строгости доказательств и последовательности изложения.

В течение более двух тысячелетий «Начала» служили руководством при изучении геометрии. Все великие математики прошлого начинали знакомство с геометрией по этой книге.

Евклид не стремился приложить свои математические способности к физике или технике. Он, правда, разработал учение об отражении лучей света от плоских и кривых зеркал. Но это было для него чисто геометрической задачей.

По свидетельству историков, о приложении геометрии к механике Евклид и не думал. Когда один юноша спросил его, какую пользу получит он от изучения геометрии, Евклид, по преданию, сказал своему слуге: «Дай этому человеку три обола¹, он ищет от геометрии пользу».

Однако скоро нашелся ученый, который посмотрел на задачи механики с точки зрения геометрии.

До того времени механика была искусством техников, усваивавших различные чисто практические правила. Приложение к ней математики превратило механику в строгую науку.

Подобно геометрии, в механике делаются выводы, исходя из известных по опыту данных — аксиом.

¹ Обол — древняя греческая монета. Во времена Гомера оболон называли железный прут, который служил в качестве монеты. Поэтому позднее мелкую монету также называли оболон.

Открытие законов равновесия тел

Знаменитейший из древнегреческих математиков, Архимед (287—212 до н. э.) первый заложил основы современной механики.

Архимед был сыном знатного, но небогатого гражданина Сиракуз — астронома Фидия. Он получил образование в Александрии, где основательно познакомился с трудами Евклида и других математиков.

Математическим дарованием Архимед превосходил всех своих предшественников и современников. Он по праву признан одним из величайших геометров всех времен и народов.

Архимед первый вычислил с точностью до третьего десятичного знака отношение длины окружности к диаметру.



Архимед за решением геометрической задачи.

Он исследовал свойства эллипса, параболы и гиперболы — кривых, полученных сечением конуса плоскостью.

Математики знали, что если пересечь прямой конус плоскостью, наклонной к его высоте, то получится эллипс. Пересечение параллельно образующей дает параболу, а параллельно высоте — гиперболу.

Но каковы свойства этих кривых? Как вычислить площадь круга, эллипса или сегмента параболы и гиперболы? Архимед нашел путь к решению подобных задач, названный в средние века «методом исчерпывания». Этот метод он и применил для вычисления площадей фигур, ограниченных кривыми.

Как найти с помощью этого метода, например, площадь круга?

Архимед вписал в круг правильный шестиугольник. Площадь этой фигуры равна сумме площадей шести треугольников, на которые разобьется шестиугольник, если соединить его вершины с центром круга.

Площадь круга больше площади этого шестиугольника на сумму площадей шести сегментов, ограниченных его сторонами и дугами круга.

Удвоив число сторон шестиугольника, Архимед получил двенадцатиугольник, площадь которого ближе к площади круга.

Затем легко вписать двадцатичетырехугольник, еще более близкий к кругу. Так постепенно «исчерпывается» площадь круга.

Тот же метод Архимед применил для вычисления площади эллипса и сегмента параболы и гиперболы.

Геометрия была главным занятием Архимеда. Он отдавал этой науке большую часть своего времени и сил. Рассказывают, будто бы Архимед решал геометрические задачи даже сидя в ванне. Он чертил на песке у своих ног, на стенах домов, везде, где это было возможно.

Но в отличие от Евклида, Архимед очень интересовался не только механикой, но и техникой. Он изобретал различные машины. Им были придуманы механизм для подъема воды — архимедов винт, полиспаст и множество других машин.

Чтобы показать значение механического расчета, Архимед устроил ручную подъемную машину, при помощи которой он мог собственными руками передвигать и поднимать огромные тяжести. Рассказывали, будто бы он

подтянул этой машиной к берегу большое трехмачтовое судно, нагруженное товарами и людьми.

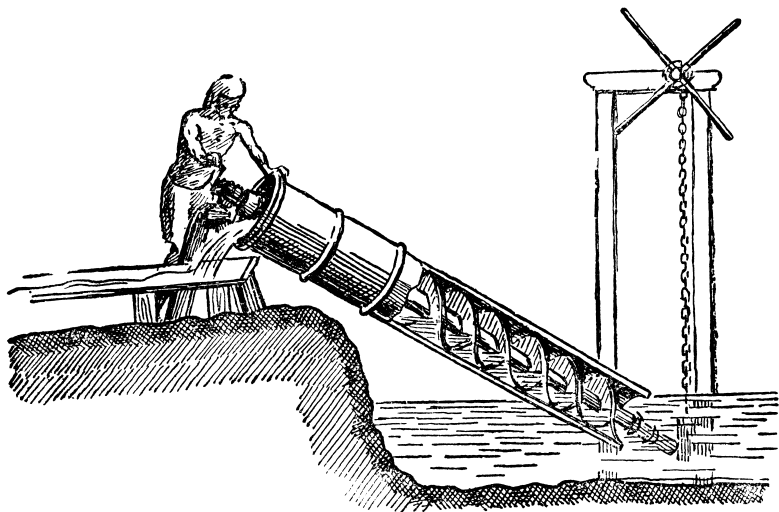
Конечно, чтобы собственной силой сделать эту работу, Архимед должен был в течение очень долгого времени крутить рукоять бесконечного винта своей машины: ведь выиграть в силе можно, лишь потеряв столько же во времени. Присутствовавший при этом опыте царь Гиерон был поражен необычайным зрелищем. Но Архимед будто бы сказал ему: «Дай мне, где стать, и я сдвину Землю».

Как техник Архимед прославил свое имя при защите родного города, осажденного в 210 году до н. э. римлянами. Только благодаря техническому гению этого великого математика удалось в течение двух лет отбивать приступы закаленных в боях римских воинов.

О защите Сиракуз Архимедом Полибий, Плутарх и другие историки сохранили множество легендарных рассказов.

Машины Архимеда бросали в наступавших крупные и мелкие камни, тучи стрел и копий. Они поражали ряды воинов, разбивали деревянные прикрытия, не допускали к стенам города разрушительных таранов.

Еще более поразительны сильно преувеличенные рассказы о борьбе Архимеда с морскими судами римлян.



Архимедов винт — механизм для подъема воды.

Со стен города на них сбрасывались тяжелые бревна. Спускавшиеся огромные когти захватывали суда, приподнимали их на воздух, а затем опускали в воду кормой или бросали их на скалы.

«Придется нам прекратить войну против геометра, — сказал предводитель римлян Марцелл, — который поднимает вверх суда с моря и превосходит сказочного сторукого великана, бросая сразу на нас такое множество снарядов».

Римлянам удалось взять Сиракузы только вследствие недостаточной бдительности охраны города в одну из ночей. Архимед был, повидимому, случайно убит. На его могиле сограждане поставили невысокую гранитную колонну с выгравированным на ней рисунком шара, вписанного в цилиндр.

Через полтора столетия всеми забытая могила великого математика и защитника Сиракуз сровнялась с почвой. Стоявший на ней памятник был почти засыпан землей.

Только с большим трудом ее нашел писатель и политический деятель Цицерон, посланный в качестве правителя Сиракуз римским сенатом.

Технические изобретения Архимеда привели его к исследованию равновесия тел. Он первый дал математический вывод закона рычага. И хотя с тех пор прошло более двух тысяч лет, никто не мог сделать лучшего вывода.

Доказательство закона рычага приведено Архимедом в сочинении «О равновесии плоскостей». В нем впервые развито учение о центре тяжести.

Конечно, некоторое смутное представление об условиях равновесия имелось еще в глубокой древности. Египтяне при сооружении храмов и пирамид пользовались отвесом. Из опыта всем было известно, что на крутом косогоре колесница может опрокинуться.

Но никто не мог точно указать, при каком условии тело сохраняет равновесие: что отвес, опущенный из центра тяжести тела, не должен выйти за пределы его опоры. Если же подпереть в центре тяжести тонкую пластинку, то она останется в равновесии при любом положении.

Архимед нашел центр тяжести треугольника, трапеции и различных многоугольников.

Представим себе, что треугольник разбит на очень узкие полоски. Очевидно, что центр тяжести каждой из них лежит на ее середине. Середины же всех полосок лежат на



Римский корабль, опрокинутый машиной Архимеда.

линии, соединяющей середину стороны треугольника с противолежащим углом, — медиане.

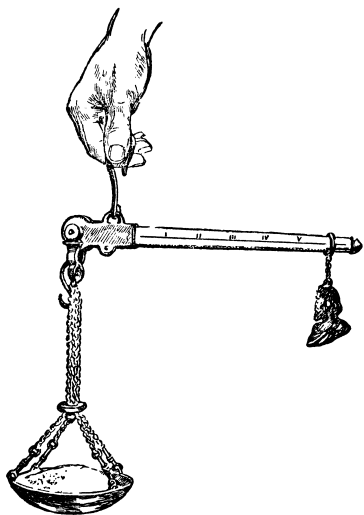
Очевидно, что на медиане должен находиться и центр тяжести всего треугольника. Но он должен лежать и на другой медиане. Значит, пересечение двух медиан и есть центр тяжести треугольника.

Эти исследования помогли Архимеду вывести закон рычага, что не удалось ранее никому из греческих философов, занимавшихся проблемами механики.

Архимед исходил из некоторых неоспоримых допущений — аксиом — о равновесии грузов, действующих на стержень. Эти аксиомы были хорошо известны всем, кто пользовался безменом.

Из повседневного опыта известно, что равновесие грузов, подвешенных по концам стержня, зависит как от их веса, так и от расстояния до точки опоры стержня.

Очевидно, что два равных груза, подвешенных на равных расстояниях от точки опоры, уравнивают друг



Безмен, широко распространенный в древнем Риме. Взвешивание на нем иллюстрирует «аксиомы» Архимеда.

друга: действительно, нет никакой причины, которая заставила бы один из них перевесить другой.

Столь же понятно, что в тех же условиях больший груз перевесит меньший.

Если же грузы равны между собой, но действуют на разных расстояниях от точки опоры, то перевесит тот, который дальше.

Вот аксиомы Архимеда, известные из повседневного опыта и положенные им в основу доказательства закона рычага.

Пусть по концам невесомого рычага подвешены грузы P и Q , уравнивающие друг друга.

Архимед делает предположение, что груз P разделен на $2m$, а груз Q на $2n$ равных между собой частей. Эти грузики распределяются равномерно вдоль невесомого стержня длиной $2(m+n)$.

Если этот стержень подперт посередине, то грузики взаимно уравновесятся, потому что по каждую сторону от точки опоры будет одинаковое число грузиков, равное $m+n$.

Не нарушая равновесия, можно заменить действие $2m$ грузиков одним грузом P , подвешенным посередине занятого ими расстояния.

Точно так же действие других $2n$ грузиков можно заменить грузом Q , подвешенным посередине расстояния, занятого этими грузиками.

Легко видеть, что точка подвеса груза P находится от точки опоры рычага на расстоянии $(m+n) - m = n$, а точка подвеса Q на расстоянии $(m+n) - n = m$ от нее.

Грузы P и Q относятся друг к другу как $P:Q = 2m:2n = m:n$, то-есть их равновесие сохраняется, если расстояния точек подвеса обратно пропорциональны весам грузов.

Вывод закона двуплечего рычага был началом учения о равновесии твердых тел — статики. Пользуясь этим законом, можно вывести условия равновесия блока, ворота, зубчатого колеса и других простых машин.

Архимед не ограничился изучением равновесия твердых тел. Он заложил и основы гидростатики. На эти исследования его навело решение одного практического вопроса.

Правитель Сиракуз, царь Гиерон, заказал мастеру отлить из золота корону. Когда заказ был выполнен, возникло подозрение, что мастер утаил часть данного ему драгоценного металла. Однако корона весила столько же, сколько было выдано золота.

Как же узнать, не заменена ли часть золота серебром?

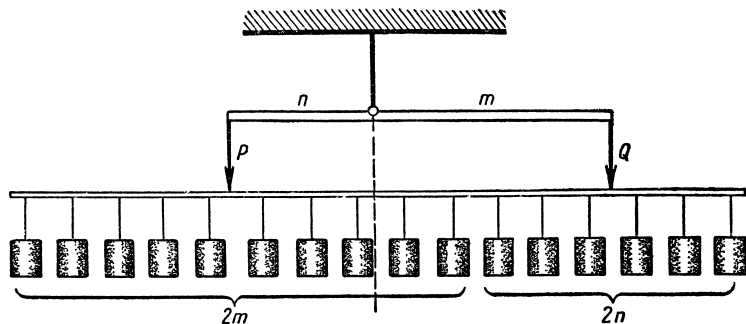
Решение этой задачи царь возложил на Архимеда.

Труднейшие проблемы Архимед решал всегда гениально просто. Так было и в этом случае.

Чем плотнее тело, тем меньше его объем при равном весе. А об объеме легко судить по количеству вытесняемой воды при погружении в нее тела.

Значит, если в короне содержится серебро, то ее объем будет больше объема того куска золота, который был выдан мастеру. С другой стороны, он будет меньше объема куска серебра, по весу одинакового с короной.

Архимед приказал дать ему кусок золота и кусок серебра такого же веса, как корона. После этого он погрузил в сосуд с водой золото, серебро и корону, собирая отдельно воду, вытесненную каждым из этих предметов.



Вывод закона рычага, сделанный Архимедом.

Оказалось, что меньше всего воды вытеснил кусок золота, больше — корона и еще больше — кусок серебра. Так Архимед доказал, что корона отлита из сплава серебра и золота.

Архимед не ограничился решением заданной ему практической задачи. Из этого опыта он вывел общий закон: «тела, которые тяжелее жидкости, будучи опущены в жидкость, погружаются все глубже, пока не достигают дна, и, пребывая в жидкости, теряют в своем весе столько, сколько весит жидкость, взятая в объеме этих тел».

Этот закон было легко проверить, подвешивая тело под чашкой весов и опуская его в воду: весы показывали, что тело становилось как бы легче на вес вытесненной воды. Это, конечно, объясняется давлением снизу вверх, оказываемым водой на погруженное в нее тело, а не действительной «потерей веса».

В наше время закон Архимеда формулируется так: жидкость действует на погруженное в нее тело с силой, направленной вертикально вверх и равной весу жидкости в объеме погруженной в нее части тела.

Продолжая исследование равновесия жидкости и плавающих тел, Архимед исходил из единственного допущения, что «при равномерном и непрерывном расположении ее частиц менее сдавленная частица вытесняется более сдавленной» и «отдельные частицы этой жидкости испытывают давление отвесно расположенной над ними жидкости».

Архимед исследовал все случаи равновесия плавающих тел. Он указал, что тело, более легкое, чем жидкость, погружается ровно настолько, что вытесненная им вода по весу равна ему. Он вывел условия равновесия плавающего шарового сегмента и сегмента параболоида вращения (тела, образованного вращением параболы около ее оси).

Наконец, Архимед первый доказал, что «поверхность всякой жидкости, пребывающей в покое, имеет форму сферы, центр которой совпадает с центром Земли».

В течение ряда веков ученые не могли ничего прибавить к этим открытиям. Инженеры и конструкторы машин пользовались статикой и гидростатикой Архимеда. Установленные великим греческим ученым принципы и в настоящее время сохраняют свое значение. Его математические методы заключают в себе зачатки высшего анализа.

Развитие античной статики

Производство рабовладельческого общества было основано на применении грубых орудий, которые «как раз вследствие своей грубости и неуклюжести трудно подвергаются порче» (К. Маркс).

Однако несомненно, что после исследований Архимеда статика продолжала развиваться еще в античное время.

Сохранились сообщения о водяных мельницах, заменивших собой ручные зернотерки. Римлянами применялась для уборки хлеба жнейка.

Особенно же много изобретатели того времени занимались придумыванием различных приборов и автоматов: часов, движущихся птиц, автоматически открывающихся и закрывающихся дверей в храмах, дверных запоров и других приспособлений. Эти изобретения возбуждали у них интерес к механике.

Знаменитыми механиками в древности после Архимеда были Ктезибий и Герон.

Ктезибий, живший около середины I века до н. э., впервые в Греции устроил водяные часы, изобрел пожарную машину, водяной орган и другие механизмы и приборы.

В водяных часах Ктезибия, по мнению некоторых историков науки, уже применялись зубчатые колеса. Устройство этих водяных часов очень просто. Главная часть их — большой сосуд, в который поступает равномерная струйка воды. Вода на дне этого сосуда постепенно поднимается. На ее поверхности плавает легкий поплавок с человеческой фигуркой. В руках у фигурки — указка, конец которой скользит по поверхности вращающегося цилиндрического циферблата. Часы градуировались по солнцу.

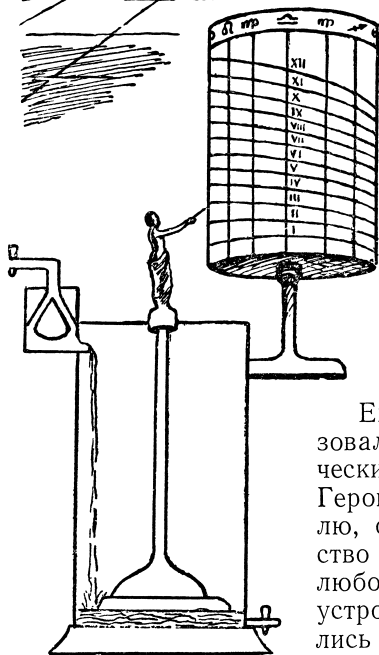
Правильность их показаний зависела от равномерности поступления воды в большой сосуд, что обеспечивалось остроумными приспособлениями.

Пожарная машина Ктезибия почти не отличалась от современной. Она была снабжена особыми клапанами, не позволявшими воде при нагнетании возвращаться в цилиндры. Идея устройства клапанов также принадлежала творцу пожарной машины.

Об изобретениях Ктезибия остались рассказы и описания живших позднее историков.



Водяные часы Ктезибия. Вода льется из трубочки в большой резервуар с поплавком, который по мере поднятия уровня воды всплывает. Фигурка на поплавке показывает часы на вращающемся цилиндре.



Еще большей славой пользовался ученик Ктезибия — греческий изобретатель и механик Герон. Подобно своему учителю, он также изобрел множество физических приборов и любопытных автоматических устройств. От Герона остались и сочинения по механике.

Герону принадлежит несколько десятков различных приборов. Простейший из них — сифон. Это изогнутая трубка, короткое колено которой опускается в сосуд с жидкостью. Если удалить

воздух из длинного колена, то жидкость наполнит всю трубку и станет выливаться через нее наружу. Истечение будет продолжаться до тех пор, пока конец колена трубки будет погружен в воду.

Это простое изобретение широко применяется в технике нашего времени.

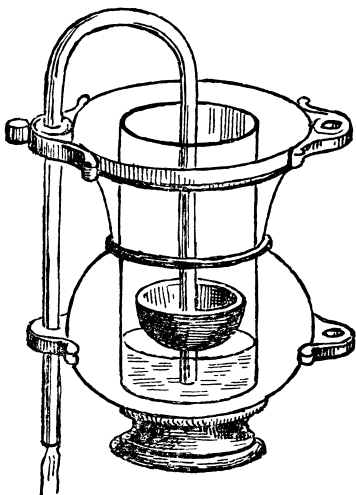
Сложнее—двойной сифон, который используется фокусниками, удивляющими зрителей «волшебным кубком».

Стоящий на столе глубокий кубок с поднимающимся с его дна столбиком не возбуждает никаких подозрений. В него можно наливать воду, которая остается, как в любом другом сосуде. Но как только уровень воды поднимется до верха столбика, то он начинает быстро понижаться, и кубок скоро опорожняется.

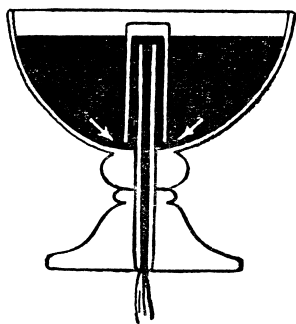
Этот фокус объясняется просто: столбик в кубке — двойной сифон; это широкая трубка, закрытая сверху и сообщаемая через незаметное отверстие в ее стенке с кубком; внутри нее есть не видная зрителю, открытая с обеих сторон узкая трубка, доходящая почти до верха широкой трубки, а нижним концом выходящая наружу; наливаемая в кубок вода стоит на такой же высоте и в широкой трубке; как только она заполнит ее доверху, то начинает вытекать через узкую трубку наружу до тех пор, пока кубок не опорожнится.

Действие сифона объясняется разностью давлений на поперечное сечение водяного столба у концов изогнутой трубки.

Герон, не зная о давлении атмосферы, сравнивал струю, вытекающую из сифона, с веревкой, огибающей



Сифон Герона. Когда из дугообразной трубки будет удален воздух и она заполнится водой, то вода вытекает из длинного колена до тех пор, пока короткое будет погружено в воду. Поплавок на коротком колене трубки позволяет сохранить постоянно разности уровней жидкости и нижнего конца длинного колена. Вследствие этого скорость истечения постоянна.



«Волшебный кубок» —
двойной сифон Герона.

блок. Нельзя, впрочем, в связи с этим не упомянуть, что столб воды в трубке сифона действительно оказывает большое сопротивление разрывающему усилию.

В своих многочисленных изобретениях Герон постоянно сталкивался с вопросами механики. Действие всех приборов Ктезибия и Герона было основано на равновесии твердых и жидких тел. Герон развивал основы статики, заложенные еще Архимедом.

Сохранилось сочинение Герона «Механика». В нем автор математически доказывал закон рычага, выводил условия равновесия и описывал устройство других простых машин.

«Желая поднять тяжесть, — писал Герон, — мы должны тянуть привязанную к ней веревку с силой, равной весу тяжести. Если же мы привяжем один конец этой веревки к неподвижному месту, а другой перекинем через привязанный к тяжести блок, то поднять тяжесть будет легче».

Итак, Герону было известно свойство подвижного блока. Пользуясь этим, он уже сконструировал полиспаст.

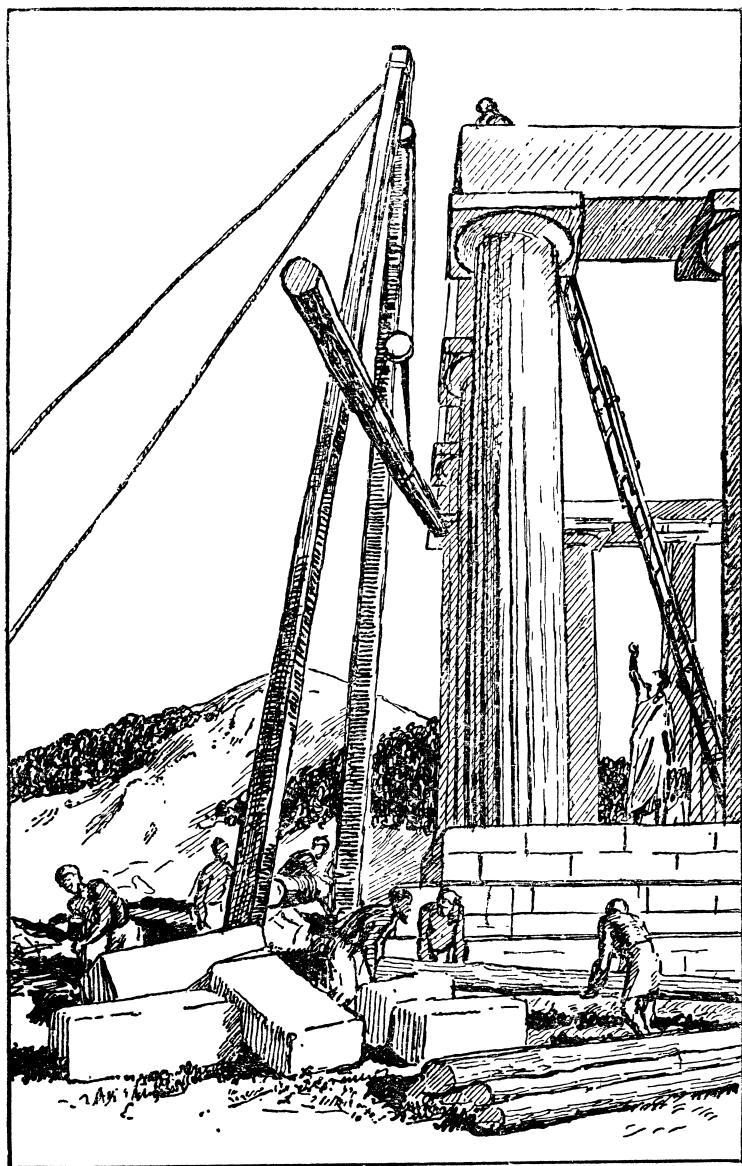
Рассмотрев действие простых машин, Герон вывел так называемое «золотое правило» механики. Он высказал это правило в такой форме: «отношение времен равно обратному отношению движущих сил».

В наше время «золотое правило» выражается так: «сколько выигрывается в силе, столько теряется в скорости».

Только теории клина и винта не мог создать Герон. Для этого нужно было знать закон наклонной плоскости, открытый лишь в XIII веке строителями зданий.

Античная техника получила большое развитие в эпоху расцвета Рима. Завладев во II веке до н. э. Грецией, римляне быстро восприняли культуру древних греков.

В Римской империи устраивались греческие школы. Появились подражания греческим литературным произведениям и скульптуре. Римляне сильно развили греческую



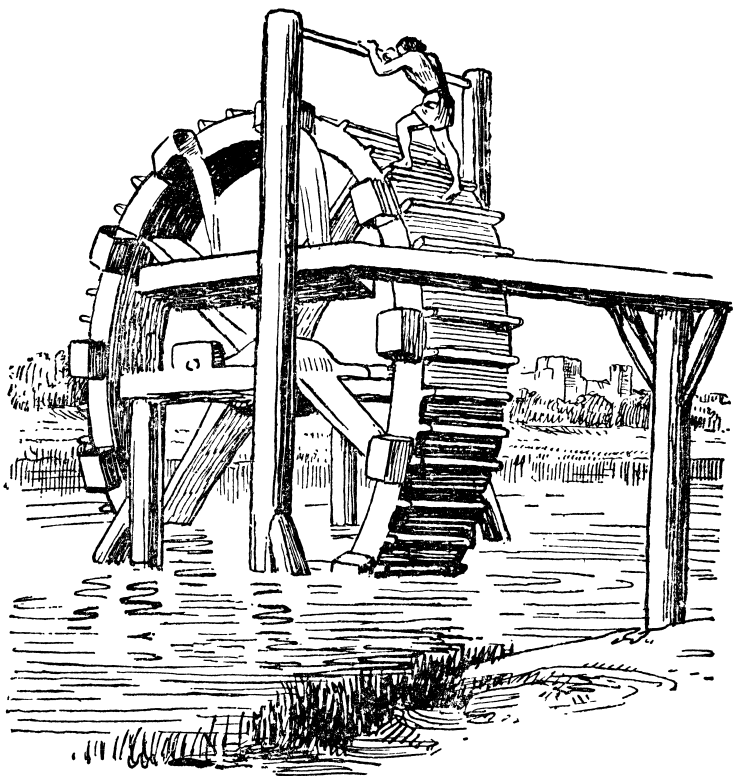
Подъемная машина античного времени. Тяжелое бревно поднимается при помощи полиспаста.

технику. Они применили в большом количестве в военном деле баллисты, катапульты и другие машины; в строительном деле — подъемные краны и различные механизмы.

Из сочинений римских техников до нашего времени дошла работа «Об архитектуре» Витрувия (конец I века до н. э. и начало н. э.).

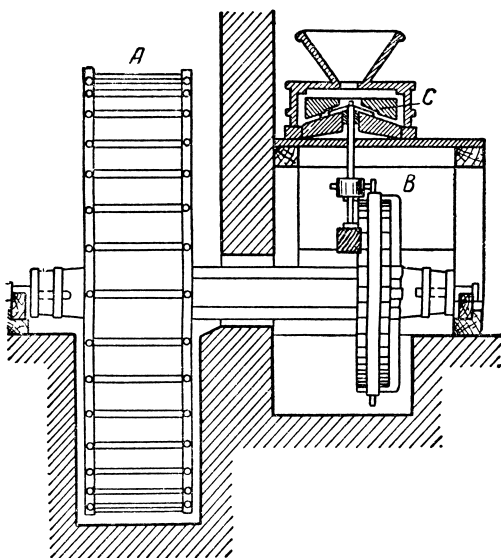
Под архитектурой Витрувий понимал вообще технику сооружения зданий, производства часов и построения машин. Из его сочинения можно видеть, какого развития достигла техника в эпоху расцвета цивилизации в Римской империи.

При возведении зданий в большом употреблении были



«Ступальное» колесо, вращающееся под тяжестью человека, переступающего по ступенькам на ободу колеса. Черпаки забирают воду из реки и выливают ее в жолоб.

подъемные машины. Они строились из дерева. Даже блоки были деревянные, хотя железо широко использовалось для изготовления инструментов. Выигрыш в силе достигался применением полиспастов. С помощью таких машин



Римская водяная мельница. Водяное колесо *A* через зубчатую передачу *B* приводит во вращение жернов *C*.

поднимались бревна и другие громоздкие, тяжелые строительные материалы.

Орошение полей производилось с помощью водочерпальных колес. Задолго до римлян искусственное орошение полей было распространено в Вавилонии, в Индии и в Египте. В этих странах водочерпальные колеса приводились в движение силой упряжных животных. Применялись также колеса, приводимые в движение и тяжестью человека, поднимавшегося по ступеням на ободу колеса.

От водочерпального колеса было нетрудно прийти к идее простейшего водяного двигателя — колеса, снабженного по ободу поперечными лопатками. Течение воды захватывает лопатки и вращает колесо. От него при помощи передач приводили в движение рабочие машины. Примером может служить римская водяная мельница.

На ось водяного двигателя насаживалось зубчатое колесо. Оно зацепляло шестерню значительно меньшего диаметра, ось которой получала более быстрое вращение.

Ось второго колеса, установленная перпендикулярно к оси первого, укреплялась в жернове. Вращаясь, жернов истирал в муку зерна, поступающие из находящегося над ним ковша.

Все эти механизмы доказывали, что римские техники были хорошо знакомы с большинством простых машин. Они с успехом пользовались ими для передачи движения от водяных двигателей и производства работы.

Но теория машин не разрабатывалась римскими техниками и механиками. В этой области они довольствовались статикой Архимеда. То же самое можно сказать о гидростатике. И в этой науке древние римляне не дали ничего нового.

Отсутствие разработанной теории простых машин при широко развитом применении их должно было вредно отражаться на античной технике.

В соответствии с механическими познаниями составлялись античное время и представления о «механизме» вселенной.

Античные ученые были знакомы лишь с некоторыми законами статики. Им были известны также простые машины. Но свободное движение тел в пространстве совершенно не было изучено ими. Поэтому греческим философам казалось самым простым объяснять движение небесных тел как связанных между собой частей машины.

Античная механика и система мира

Вселенная — это солнца-звезды и планеты, свободно движущиеся в пространстве. Чтобы понять ее строение, нужно знать законы движения тел.

Первое, что поражает наблюдателя неба, — кажущееся суточное круговращение светил.

В северной части неба звезды движутся, как в хороводе, вокруг небесного северного полюса, лежащего вблизи Полярной звезды. В южной части они восходят, описывают дугу по небесному своду и заходят под горизонт. Остальная часть их кругового пути скрыта от наших глаз.

В суточном вращении, происходящем, как кажется на-

блюдателю, вокруг Земли, участвуют также Луна, Солнце и планеты.

Эти наблюдения и легли в основу естественно-научного мировоззрения древних греков.

Ученые античного мира были далеки от мысли, что суточное вращение неба — только кажущееся явление. Они считали восходы и заходы действительным круговым движением светил. Но в то же время они не могли представить себе, чтобы свободные тела совершали такое движение в пространстве. Поэтому греческие астрономы решили, что звезды, планеты, Луна и Солнце прикреплены к твердой вращающейся сфере. Внутренняя поверхность этой сферы, по мнению древних ученых, и есть видимое нами голубое небо.

Такая простая модель вселенной недолго удовлетворяла ученых. Луна, Солнце и планеты совершают, кроме суточного вращения, и другие движения: в то время как звезды сохраняют неизменным свое положение относительно друг друга, эти светила перемещаются среди них в направлении, обратном суточному вращению. Поэтому восход этих светил каждый день запаздывает.

Луна в течение 27,3 суток обращается с запада на восток вокруг Земли, перемещаясь среди неподвижных звезд, что каждый может легко видеть, понаблюдав за ней в течение нескольких дней. Одновременно с этим она участвует также и в суточном вращении неба с востока на запад.

Сложное движение Луны греческие астрономы объясняли так: Луна прикреплена к сфере, совершающей оборот на оси с запада на восток в течение 27,3 суток. Звездная же сфера в своем суточном вращении увлекает лунную сферу.

Значит, лунная сфера в течение суток перемещает Луну на $\frac{360^\circ}{27,3}$, или около $13,2^\circ$ к востоку. Суточное же вращение движет ее к западу на $\frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$ в час. Поэтому восход Луны каждый день запаздывает на $\frac{13,2}{15}$ часа, или приблизительно на 52,8 минуты.

Солнце также совершает круговой путь среди звезд, переходя из одного созвездия Зодиака в другое. В течение года оно делает полный круг, в чем легко убедиться, понаблюдав некоторое время восходы и заходы звезд.

Заметим какую-либо яркую звезду в южной части неба. Она, как говорят, «загорается», когда Солнце достаточно низко опустилось под горизонт и небо потемнело. В это время звезда находится к востоку от Солнца. Через некоторое время эта звезда будет видна в тот же час ближе к горизонту. Значит, она приблизилась к Солнцу.

Но звезды не меняют своего положения относительно друг друга. Следовательно, Солнце передвинулось среди них к востоку.

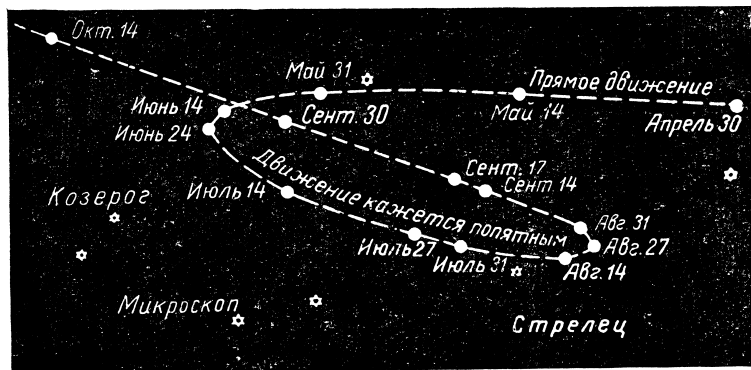
Действительно, в дальнейшем звезда станет невидима по вечерам, потонув в солнечных лучах. Но зато по прошествии еще некоторого времени она будет появляться по утрам, перед восходом Солнца, то-есть к западу от него.

Так, перемещаясь равномерно все время на восток, Солнце переходит из одного созвездия в другое. Поэтому те созвездия, которые сияют на летнем небе, не видны зимой.

В действительности, как известно, это — кажущееся движение. Оно является отражением движения Земли вокруг Солнца.

Но древние греческие астрономы принимали кажущееся перемещение Солнца среди звезд за реальное движение. Они объясняли его вращением с запада на восток особой сферы, к которой будто бы прикреплено Солнце.

Еще труднее было понять видимое перемещение среди звезд внешних планет: планета то движется с запада на восток, то останавливается и пятится, а затем снова дви-



Видимое движение планеты Марс среди звезд.

жется в прежнем направлении. Полный круг среди звезд планеты совершают в разные сроки. Но в течение года каждая из них делает «петлю».

Греческие астрономы считали невозможным приписать небесному механизму какое-либо иное движение, кроме равномерного и кругового. Поэтому для объяснения видимого перемещения планет предположили, будто каждая из них связана с четырьмя концентрическими, вложенными одна в другую сферами. Эти сферы вращаются около различно направленных осей, концы каждой из которых упираются в стенки внешней сферы. Вращение этих сфер объясняло как поступательное движение планеты с запада на восток, так и попятное движение, когда она делает петлю.

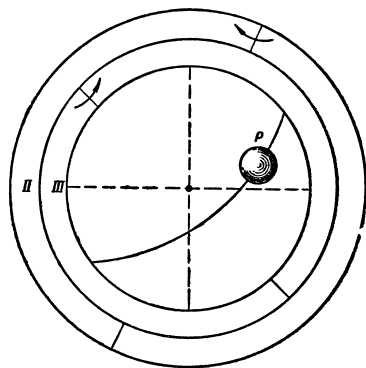
Так была создана необычайно сложная модель вселенной, все части которой вращались равномерно около одного центра — Земли. А комбинация этих вращательных движений давала наблюдаемое перемещение светил.

Описанная модель мира хотя и объясняла в общих чертах видимое перемещение светил, но не позволяла предвычислять их положение на небе.

Чтобы решить эту последнюю задачу, античным астрономам пришлось отказаться от вращающихся сфер. Александрийский математик и астроном Клавдий Птолемей (70—147) построил чисто геометрическую схему движения планет.

О жизни Клавдия Птолемея не сохранилось сведений. Известно только, что он был родом из Верхнего Египта и жил в Александрии. Но созданная им система мира, господствовавшая в Европе в течение около двух тысячелетий, увековечила его имя в истории науки.

Схема Птолемея давала возможность предсказывать наперед, среди каких звезд будет видна планета в тот или иной момент.



Планета *P* увлекается движением сферы *III*, ось вращения которой укреплена концами в сфере *II* и разделяет ее вращательное движение.

В схеме Птолемея каждая планета движется по кругу, центр которого обращается вокруг Земли. Комбинация этих двух движений и дает кажущееся перемещение планет. Однако эта схема, позволяя предвычислять положение планет, не давала понятия о строении вселенной: нельзя было представить себе, почему планеты могут совершать такие движения. Поэтому система Птолемея оставалась чисто геометрической схемой.

Необходимость в столь сложной схеме отпала бы, если предположить, что сама Земля вращается около оси и обращается вокруг Солнца. Греческие астрономы понимали это.

«Существуют люди, — писал Птолемей, — которые утверждают, будто бы ничто не мешает допустить, что небо неподвижно, а Земля вращается около своей оси от запада к востоку и что она делает такой оборот каждые сутки. Правда, говоря о светилах, ничто не мешает для большей простоты допустить это, если принимать в расчет только видимые движения».

Но состояние механики того времени не позволяло остановиться на этом предположении. Вращение Земли казалось невозможным, хотя ее шарообразность была признана всеми греческими астрономами.

Не зная инерции, древние греческие механики были уверены, что если бы Земля вращалась, то птицы, поднявшиеся на воздух, отставали бы от земной поверхности. Никакое тело не могло бы двигаться к востоку, потому что Земля в своем вращении опередила бы их движение.

Как думал Птолемей, тяжелые предметы на вращающейся Земле отрывались бы от нее подобно камню при круговом взмахе пращи. Подобными же соображениями он отвергал мысль и об обращении Земли вокруг Солнца.

Только прогресс динамики позволил через много веков отказаться от мнения о неподвижности Земли.

Крушение античной культуры

Наивысшего расцвета античная культура достигала в период от начала I века до н. э. и до конца I века н. э.

Рабовладельческий строй был прогрессом по сравнению с предшествовавшим ему общинно-родовым строем, но он характеризовался жестокой эксплуатацией рабов и низкой производительностью труда.

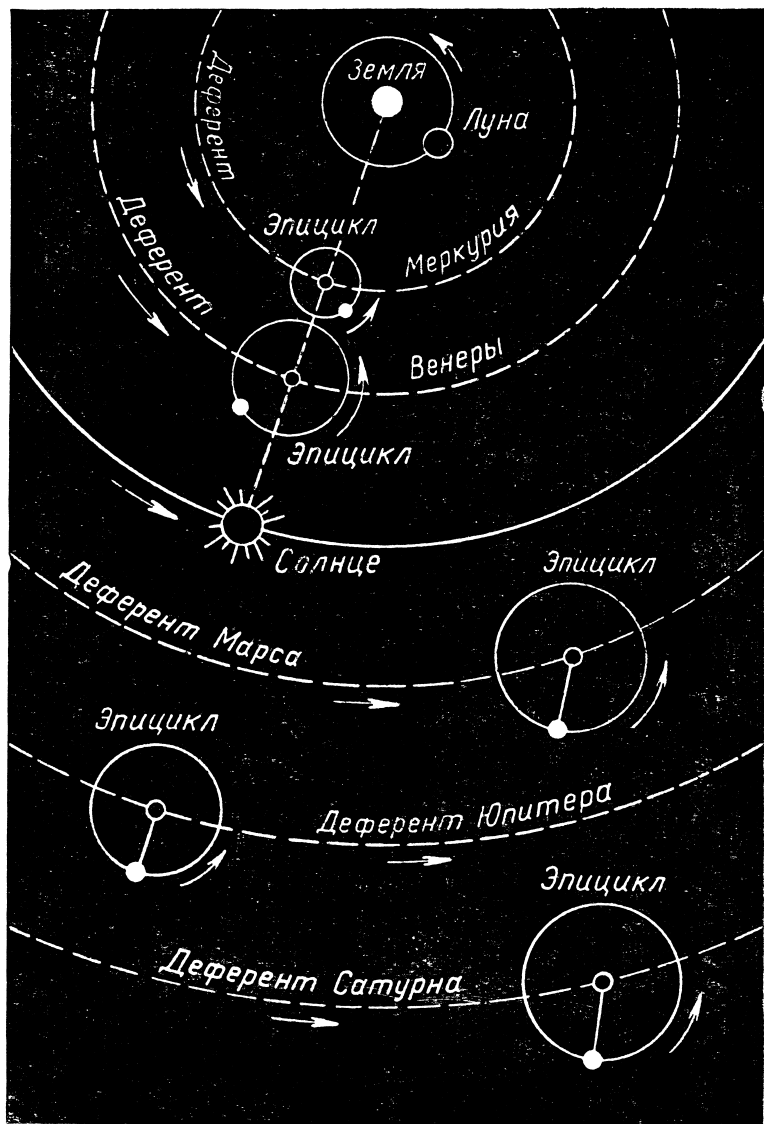


Схема движения планет по Птолемею.

Однако уже в первые века н. э. в рабовладельческом обществе Римской империи началось изменение экономических условий. Зарождались новые производственные отношения. Возникло революционное движение рабов и мелких арендаторов земли — колонов.

Эти внутренние потрясения совпали с нападениями на Римскую империю извне.

Германские племена вторгались из-за Рейна в пределы Римской империи и разрушали города. В конце IV века кельты заняли Северную Италию и даже ворвались в Рим.

Правда, римляне скоро снова завоевали захваченные кельтами земли. Они «романизировали» вторгшиеся племена, то-есть привили им римскую культуру. После этого кельты, занявшие Северную Италию, вошли в состав римского рабовладельческого общества.

Но нападения «варваров» продолжались. Предводители наемных войск приобретали все большее влияние в Риме. Наконец в 476 году римский император Ромул Августул был низложен ими и сослан в далекую провинцию. Так кончилось существование Западной Римской империи, на территории которой образовалось несколько самостоятельных государств.

Задолго до этого события культура в Римской империи стала клониться к упадку. С развитием крупного землевладения промышленность и торговля в городах замирали. Забывались техника и наука.

Крупные землевладельцы не нуждались в наемных плотниках, кузнецах и других ремесленниках, имея этих специалистов среди своих рабов. Они обучали молодых рабов музыке, живописи и архитектуре, чтобы не обращаться к свободным художникам, музыкантам и инженерам.

Большую роль в гибели античной культуры сыграло христианство, признанное в конце античной эпохи государственной религией. Руководители церкви видели в науке древних философов-язычников врага религии. Они боролись с распространением античной науки.

В 390 году толпа христиан-фанатиков под предводительством епископа уничтожила значительную часть рукописей Александрийской библиотеки. Знаменитая в V веке ученая, дочь математика Феона — Гипатия, была убита при возмущении христиан в 415 году в Александрии.

С концом Западной Римской империи как государства, объединяемого Римом, быстро угасли античная культура и наука. Упадок науки наблюдался и в Восточной Римской империи. Под влиянием христианской церкви византийский император Юстиниан в 529 году закрыл афинские философские школы.

Последние греческие философы уехали в Персию, чтобы там продолжать преподавание античной мудрости. Но и в Персии они не нашли благоприятных условий, хотя персидский царь и был любителем философии.

Не удалось сохраниться античной науке также в Сирии и Месопотамии. Там были греко-христианские философские школы, которым покровительствовал епископ Несторий. Но в 431 году Несторий был низложен вселенским собором руководителей церкви. Он должен был бежать, после чего закрылись и философские школы.

Наконец в 640 году Александрия была взята арабами, разрушавшими научные учреждения: библиотеки, обсерватории, школы. Погибла и сохранившаяся еще до того времени часть Александрийской библиотеки.

Рассказывают, что предводительствовавший арабскими войсками халиф Омар приказал уничтожить библиотеку, сказав: «Если в этих книгах говорится то, что есть в Коране, то они бесполезны. Если же в них говорится что-нибудь другое, то они вредны. Поэтому в том и другом случае их надо сжечь».

Прекращение деятельности Александрийской академии было роковым событием для античной науки.

Все знания древних ученых оказались надолго похороненными в покрытых пылью фолиантах на полках сохранившихся частных и монастырских библиотек. Они не были известны широким массам, потому что греческие и римские ученые не стремились к популяризации знаний.

Только значительно позднее античная наука возродилась среди арабов и народов Средней Азии.

Возрождение античной механики

В раннем средневековье на арену мировой истории выдвинулся новый народ — арабы.

Частью пастушеские, частью оседлые племена арабов в V—VII веках стали постепенно переходить от общинно-

родового к феодальному строю. Разложение родовых отношений особенно сильно шло в Западной Аравии, где были крупные арабские города: Мекка и Медина.

В Аравии и Северной Африке образовалось несколько феодальных государств, в которых широко распространилось магометанство. Руководители «общины верующих» — халифы — захватили власть в арабских государствах и стали светскими правителями.

Стремясь к расширению своей власти, они начали походы в соседние страны, население которых насильственно обращалось в магометанство. Арабские завоеватели вели себя как фанатики. Они прекращали деятельность культурных учреждений в покоренных странах, сжигали библиотеки, уничтожали астрономические инструменты.

Однако, как это случилось ранее с римлянами, арабы скоро подпали под влияние культуры покоренных ими народов.

По распоряжению халифов, уже со второй половины VIII века переводились на арабский язык сочинения греческих философов, математиков, астрономов. Этот язык скоро стал играть такую же роль в странах Ближнего Востока, как позднее латынь в Западной Европе. На арабский язык переводились сочинения не только греческих, но и египетских, вавилонских и индийских ученых.

Этим и объясняется тот факт, что историки долго называли «арабами» авторов всех сочинений, написанных по-арабски. Арабы и обращенные в магометанство народы Ближнего Востока вели счет времени по лунным месяцам. Их купцы в далеких путешествиях должны были уметь определять направление пути по звездам. Поэтому арабские ученые очень заинтересовались астрономическими познаниями древних греков.

Астроном и математик Бируни (972—1048) из Хорезма оставил два больших сочинения: одно — по астрономии, другое — по геометрии.

Он придумал также замечательный способ определения размеров Земли.

Если подняться на гору и мысленно соединить точку стояния наблюдателя и точку горизонта, на которую направлен луч зрения, с центром Земли, то получится прямоугольный треугольник. У него один катет равен радиусу Земли, а гипотенуза длиннее радиуса Земли на высоту горы. Угол в центре Земли между катетом и гипоте-

нузой равен углу между лучом зрения, направленным на горизонт, и горизонталью.

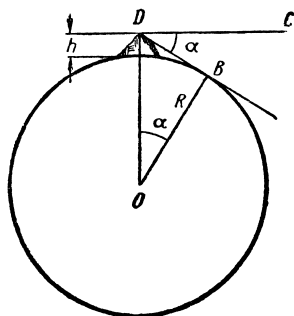
Измерив этот угол и зная высоту точки стояния наблюдателя, легко по правилам тригонометрии вычислить и радиус Земли¹.

Бируни осуществил такое измерение. Он поднялся на гору и с высоты ее измерил угол между направлением на горизонт и горизонтальной линией. По этому углу он вычислил радиус Земли.

Правда, это измерение не дало очень точного результата. На него повлияло преломление луча, идущего от горизонта, в атмосфере: переходя из одного слоя воздуха в другой, луч немного загибается к земной поверхности, поэтому измеренный угол меньше, чем он есть в действительности.

Но если ввести соответствующую поправку, то такое измерение дает удовлетворительный результат. В то же время оно сравнительно очень легко осуществимо и может быть сделано даже на небольшом острове. Обычные же измерения дуги меридиана производятся на больших площадях и стоят очень дорого.

Ученые Средней Азии много сделали и для развития математики. Они переводили математические сочинения Евклида, Архимеда, Птолемея, индийского математика VI века Брамагупты.



Измерение радиуса Земли, сделанное узбекским ученым Бируни.

¹ Пусть угол между направлением луча зрения на горизонт и горизонталью равен α . Он равен углу между радиусами Земли, проведенными к точке стояния наблюдателя и к горизонту (вследствие взаимной перпендикулярности сторон).

Тогда из треугольника DOB имеем $\overline{DB}^2 + \overline{BO}^2 = \overline{DO}^2$, откуда $\overline{DB} = \sqrt{\overline{DO}^2 - \overline{BO}^2} = \sqrt{(R + h)^2 - R^2} = \sqrt{2Rh + h^2}$.

Так как h по сравнению с R очень мало, то можно принять,

что $\overline{DB} = \sqrt{2Rh}$.

Но $\overline{DB} = R \operatorname{tg} \alpha$, поэтому $R \operatorname{tg} \alpha = \sqrt{2Rh}$ и $R = \frac{2h}{\operatorname{tg}^2 \alpha}$.

Известный математик Ибн Муса из Хорезма ввел принятое в Индии написание чисел, в котором цифра приобретает значение от занимаемого ею места. В своих трудах по арифметике и алгебре он дал общее решение квадратного уравнения, изложил правило пропорций и решил ряд практических задач.

Арабские математики занимались и тригонометрией. Они составляли таблицы тригонометрических функций, что облегчило им астрономические расчеты.

Для астрономических наблюдений было построено несколько обсерваторий — в Багдаде, Самарканде и других городах. Обсерватории снабжались усовершенствованными инструментами.

В технике измерений астрономы Средней Азии достигли больших успехов. По точности своих измерений они превосходили античных астрономов.

Но физика и механика значительно меньше интересовали ученых Средней Азии и Аравии. Из сочинений на арабском языке по механике известно только одно — «Книга о весах мудрости» узбекского ученого Альгацини. Этот ученый жил в XII веке в Хорезме — области, лежавшей в нижнем течении Аму-Дарьи, в нынешнем Узбекистане.

От древних механиков средневековые ученые унаследовали только статику Архимеда. Альгацини повторил в своей книге о весах учение о центре тяжести, о равновесии рычага и плавающих тел. Он указал на сферичность поверхности покоящейся жидкости, на потерю веса тела, погруженного в воду.

В статике Альгацини оставался на уровне античной механики. Но он впервые дал ясное определение скорости как отношения пройденного пространства ко времени. Он отметил также, что вес пропорционален массе тела.

Эти идеи далеко опережали его время.

«Весы мудрости» Альгацини заслуживают большого внимания. Они состояли из равноплечего коромысла с чашками по концам. На коромысле были нанесены деления, и оно могло служить безменом. Имелась чашка для взвешивания тел в воде при определении их удельного веса. Пользуясь этими весами, Альгацини очень точно определил относительную плотность многих металлов и минералов.

Обладая значительными математическими познаниями

и владея искусством точных измерений, арабские ученые не занимались, однако, физическими опытами и наблюдениями. Механика же, как наука о движении и силах природы, не могла быть развита без наблюдений и опытов.

Арабские ученые не оказали влияния на развитие физики и механики. Однако европейская наука обязана им сохранением трудов античных математиков, механиков и астрономов. Многие сочинения античных ученых известны только в арабских переводах, так как подлинники их утеряны или погибли.

В течение раннего средневековья, когда в Европе место науки заняло богословие, молодые европейцы изучали естествознание и механику в арабских высших школах.

Восточная техника оказала большое влияние на развитие текстильной промышленности и на обработку металлов. Вероятно, из Сирии были заимствованы мельницы.

Развитие производства в Европе потребовало искусных техников, знакомых с обработкой шелка, хлопка и другого сырья. Возникла потребность в знании механики.

Наука в средние века в Европе

На месте Западной Римской империи в начале средневековья образовались самостоятельные государства. Рабовладельческий строй конца античного периода сменился феодальным.

Раннему средневековью досталось только несколько городов, уцелевших от разрушения военными бурями. Но эти города уже не были промышленными и культурными центрами.

В Европе господствовало натуральное хозяйство, довольствовавшееся продуктами собственного производства. Торговля почти вовсе прекратилась.

Образованным классом стало духовенство. Место философии античного времени заняло богословие. Астрономия, физика, математика были забыты. Редкие монахи в тиши келий осмеливались иногда тайком разбирать рукописи древних философов, мучась страхом божьего наказания за знакомство с учением язычников.

На почве всеобщего невежества пышно расцвели лженауки: астрология, алхимия и даже магия, то-есть колдовство.

Знатные и богатые люди держали при себе астрологов, которые должны были предсказывать им по звездам будущее.

Алхимики проводили долгие годы в мрачных лабораториях, изыскивая способ превращать свинец в золото или пытаясь составить фантастический «жизненный эликсир».

Религия относилась враждебно к изучению физических явлений. С религиозной точки зрения лишь «божественное откровение» должно быть предметом познания. А о «божественном откровении» можно узнать только в библии. Наука же древних философов противоречит «священному писанию».

Таково было мировоззрение, господствовавшее в раннем средневековье. Чтобы поддержать и укрепить это мировоззрение, церковь захватила в свои руки все существовавшие школы. Она дала образованию нужное ей направление: подготовка грамотных людей для господствовавшего класса феодалов и служителей религии.

В школах преподавалось «семь свободных искусств»: грамматика, риторика, диалектика, геометрия, арифметика, астрономия и музыка. Но это было лишь слабое подобие «семи свободных искусств» античности.

Важнейшей из школьных наук стала латинская грамматика, изображавшаяся на рисунках в виде «царицы искусств» с короной на голове. В левой руке она держала пучок розог для наказания ленивых, а в правой — нож для подчистки ошибок.

Монахи нещадно наказывали неуспевавших учеников. Один из распространеннейших учебников грамматики носил заголовок: «Береги спину», а выражения «находиться в обучении» и «ходить под розгою» часто употреблялись одно вместо другого.

Риторика изучалась только в целях развития церковного красноречия. Она должна была служить помощью при составлении проповедей.

Диалектика, или логика, считалась «служанкой» богословия. Ее задачей было способствовать победе в спорах с «еретиками».

Еще удивительнее были остальные «искусства», изучавшиеся в школах раннего средневековья.

Арифметика учила истолковывать мистическое значение чисел, встречающихся в библии. Геометрией называли фантастические описания далеких стран.

Астрономия служила лишь для определения дат некоторых церковных праздников, а изучение музыки было нужным только для сопровождения церковных служб.

Понятно, что такие школы не могли способствовать развитию науки о природе.

Но церкви не удалось удержать в состоянии столь глубокого невежества народные массы Западной Европы. В XI веке начались крестовые походы. Солдаты-крестьяне и их предводители-рыцари познакомились с культурой Востока. Окрепили торговые связи. Из восточных стран были вывезены компас, порох и другие неизвестные еще в Европе вещи.

Среди европейской молодежи возникло стремление к знакомству с наукой Востока. Юноши уезжали в Кордову, Севилью, Толедо, чтобы учиться там в арабских высших школах.

Между тем с течением времени в Западной Европе постепенно ремесло отделилось от сельского хозяйства. Развивалась торговля. Освобождавшиеся от крепостной зависимости ремесленники и купцы селились в городах — как уцелевших от античного времени, так и в новых.

С развитием городов в феодальном обществе появился новый общественный слой — бюргеры. В него входили купцы, ремесленники и другие обитатели городов, освободившиеся от крепостной зависимости.

Ремесленникам и купцам понадобились знания для решения практических задач, связанных с производством и торговлей. В городах стали возникать нецерковные школы, в которых преподавались математика, астрономия, механика, архитектура и другие светские науки, необходимые для техники и кораблевождения.

Городские нецерковные школы содержались за счет платы, взимавшейся с учащихся, то-есть были частными школами. Их руководители нередко приходили в столкновение с церковниками по философским вопросам.

В связи с развитием торговли и ремесел скоро понадобилась судебная защита от посягательств на имущество и предприятия бюргеров. Юристы обратились к римскому праву, которое стало изучаться в школах, открывавшихся по инициативе жителей городов.

В XI веке объем изучаемых в городских школах наук увеличился. Эти школы стали преобразовываться в университеты, выпускавшие юристов и врачей.

Первый университет был организован из городской школы в Болонье в конце XI века. Он скоро прославился выпускавшимися им знатоками римского права.

Вслед за тем стали возникать и другие университеты. Первым из них был Парижский, утвержденный королевской властью в 1200 году.

Церковь стремилась не упустить из своих цепких рук высшую школу. Она назначала канцлеров, стоявших во главе университетов, профессоров, читавших лекции, и давала средства на содержание этих учебных заведений.

В «канцлерских» университетах церковь полновластно руководила направлением образования. Она зорко следила и за «королевскими» университетами, подготавливавшими государственных чиновников.

Влияние церкви очень вредно отразилось на развитии университетов. Вместо науки о природе все внимание преподавателей было обращено на богословие. Культивировалось искусство вести споры-диспуты. Античную физику и математику преподавать в университетах запрещалось.

Только в 70-х годах XIII века римский папа допустил в них сочинения Аристотеля, очищенные от всего, что противоречило библии.

Скоро, однако, отношение к древней философии изменилось. Церковь стала видеть в ней единственную возможность отвлечь свойственную человеку пытливость от опытного исследования природы.

Исправленные и комментированные сочинения Аристотеля стали единственным источником школьного знания. Профессора должны были давать клятву, что они не отступят в своих лекциях от учения этого философа.

Университетское образование заключалось в изучении творений Аристотеля и его комментаторов. Сомнение в правильности или критика его учения, хотя бы оно не согласовывалось с наблюдением, стали опасными.

Однако некоторые мнения древних ученых, противоречившие библии, не остались вовсе неизвестными в средние века. Об этом свидетельствуют различные сообщения, относящиеся к той эпохе.

Например, на полях рукописи, принадлежавшей одному монастырю, помечено, что Земля имеет фигуру шара. Скипетр Генриха II, по словам хроникера того времени, был «изображением земного тела, которое вообще признается шарообразным».

Один французский писатель XIII века писал, что «Земля кругла, так что человек мог бы обойти вокруг нее, как муха вокруг яблока», но в то же время утверждал, будто «как сердце находится в середине тела, так и ад в середине Земли».

Наука средневековых университетов получила название схоластики. Она была оторвана от опыта. Важнейшую роль в образовании играла софистика — искусство вести «ученые» споры.

Темами для диспутов нередко служили не имеющие смысла вопросы. Например, сколько ангелов может уместиться на острие иглы и тому подобные нелепости.

Но уже в XIII веке нашлись люди, понявшие бесплодность университетской науки того времени. Они призывали к опытному изучению природы и наблюдениям над ее явлениями.

Призыв к наблюдению и опыту

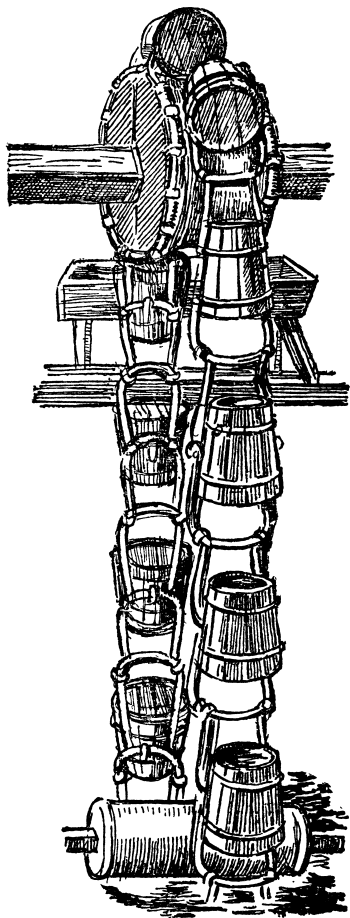
Развивавшееся горное дело и промышленность ставили задачи, требовавшие для их разрешения знания механики. Рудничные выработки встречали подземную воду. Нужно было найти способ бороться с ее притоком.

В XIII—XV веках уже возводились большие здания и сооружения. Во Флоренции был построен огромный собор. Проектирование его купола представляло серьезную задачу статики: чтобы соорудить этот купол, понадобилась сложная система рычагов и наклонных плоскостей.

Возводились многочисленные крепости, окруженные стенами, плотины и пристани, подверженные прибою волн. Возникла проблема прочности, разрешение которой требовало широко поставленных опытов. Для строительства всех этих сооружений нужны были машины, изобретаемые самими строителями.

Задачи, возникавшие перед техниками, мастерами и ремесленниками, должны были разрешаться простыми людьми, не имевшими школьного образования.

Университетские ученые пренебрегали практикой. Схоластическая наука все более уходила в умозрительные тонкости. Деканы, доктора и магистры проводили время в бесплодных спорах. Черпая свои знания в богословских и философских книгах, они с презрением отвергали наблюдение и опыт.



Водоотливное устройство, приводимое в движение водяным колесом.

Почувствовалась настоящая необходимость прибегнуть к экспериментированию, к чему еще в XIII веке призывал англичанин Роджер Бэкон (1214—1294).

Бэкон занимался астрономическими наблюдениями, различными опытами и изобретением механизмов. В своих сочинениях он смело предсказывал, чего может достигнуть наука, познав законы природы.

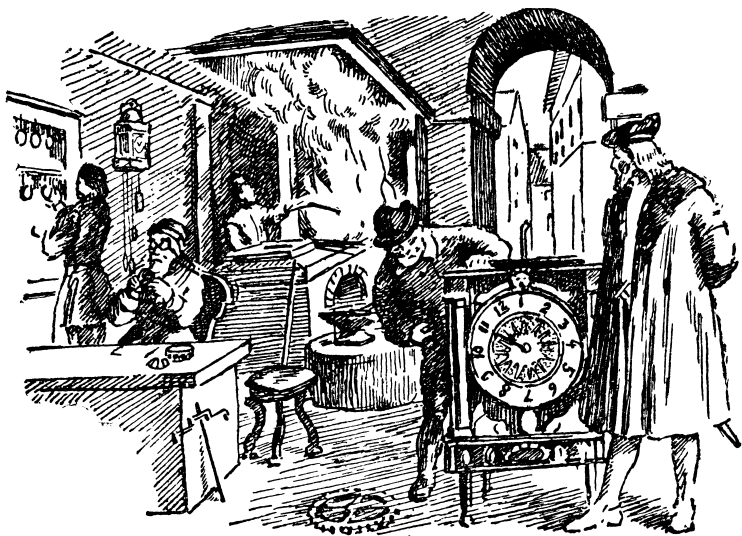
«Могут быть построены корабли, гребущие без людей, — писал он, — так что, направляемые одним человеком, они будут двигаться с большей быстротой, чем если бы они были полны гребцами. Можно также устроить экипажи, которые будут двигаться без животных».

Механика того времени, конечно, не могла осуществить эти идеи. Но Бэкон правильно указывал на путь для покорения природы: опыт и математическая обработка его результатов.

«Без собственного опыта (эксперимента) невозможно достаточное познание», — говорил он. Математику Бэкон считал ключом к наукам о природе. Только путем прило-

жения математики можно прийти к истине.

Со страхом и ненавистью встретили схоласты призывы Бэкона к экспериментированию. В исследованиях природы они видели угрозу схоластике. Церковники опасались подрыва религии и гибели их собственного благополучия.



Средневековая часовая мастерская.

Бэкон за свои опыты с простой камерой-обскурой¹ был обвинен в колдовстве и заточен в тюрьму, откуда вышел глубоким стариком.

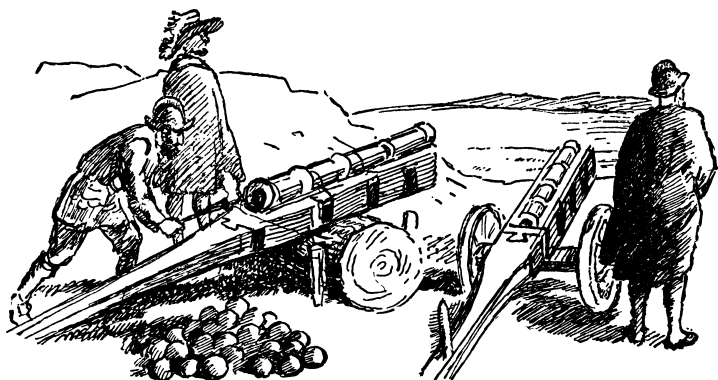
Хотя сам Бэкон не оставил потомству открытий в физике, но его призыв к экспериментированию нашел последователей. Всё чаще стали раздаваться голоса о необходимости отказаться от умозрений и стать на путь опытного исследования природы.

Не получая помощи от схоластов, практики сами занялись экспериментально-теоретическими исследованиями.

В мастерских ремесленников и художников производились опыты. Изучалось движение брошенных тел, прочность материалов и другие возникавшие вопросы.

Техники того времени — художники, архитекторы, инженеры — редко имели университетское образование. Свои теоретические познания они черпали из разного ро-

¹ Камера-обскура — физический прибор, состоящий из не пропускающего свет ящика; в передней стенке его имеется небольшое отверстие с линзой, через которую проходят лучи света, дающие на противоположной стенке обратное изображение предмета.



Полевые орудия XVI века, окованные для прочности обручами.

да руководств и научно-популярных книг. На вопросы, не разрешенные в этих книгах, они искали ответа в наблюдениях и опытах.

Развитие техники скоро поставило новые проблемы перед механикой.

В 30-х годах XIV века появилось огнестрельное оружие. Оно получило широкое применение, произведя переворот в военном искусстве. С усовершенствованием пушек возникла задача дать правила наводки их для меткой стрельбы.

Статика Архимеда не могла служить для решения этого вопроса, а динамика Аристотеля только вводила в заблуждение артиллеристов: рассчитанные по ней таблицы давали грубо неверные указания.

Одним из самых выдающихся экспериментаторов-самоучек того времени был знаменитый итальянский художник Леонардо да Винчи (1452—1519).

Отданный в ученье к художнику Вероккио, Леонардо скоро превзошел в искусстве живописи своего учителя. Ему едва исполнилось двадцать два года, как его имя уже было внесено в «Красную книгу» цеха живописцев Флоренции.

Герцог Флоренции устроил в собственном саду мастерскую художнику, которого ожидала блестящая будущность.

Но Леонардо часто забывал о живописи, предаваясь

наблюдениям над явлениями природы. Его интересовали и течение рек, и плавное движение облаков, и причина ветров, и механизм полета птиц.

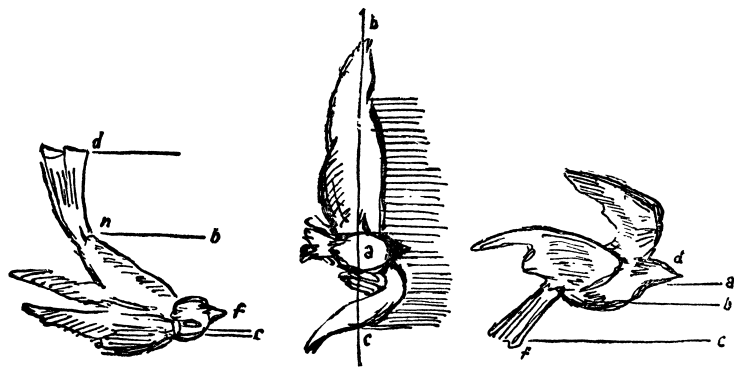
Отдалившись от общества флорентийских художников, он был вынужден поступить на службу к герцогу Милана в качестве «главного инженера, бомбардира и строителя крепостей».

На службе у миланского герцога Леонардо сооружал крепости, осушал болота долины реки Арно, снабжал столицу водой и руководил постройкой зданий в Милане.

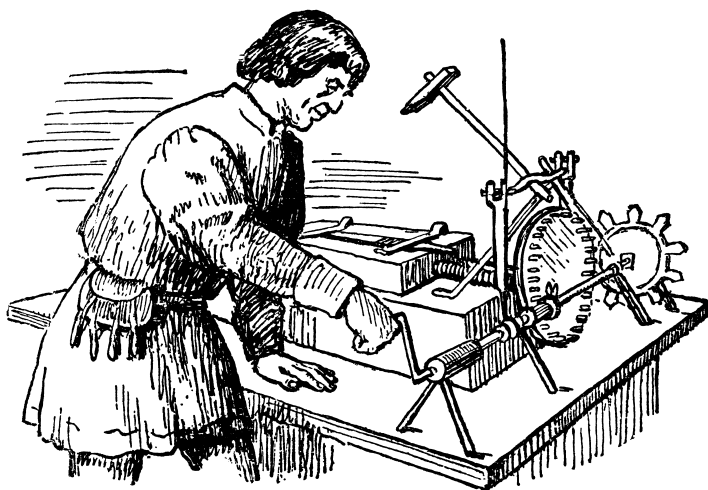
При строительных работах он пользовался различными машинами, которые нередко сам изобретал или давал им новую конструкцию. Эти занятия наталкивали Леонардо на проблемы механики, выходившие за пределы статики Архимеда.

Свои расчеты и заметки он делал на страницах записной книжки, которую всегда носил привешенной к поясу. Эти книжки грудami скоплялись на столах и по углам его рабочей комнаты. На их страницах был хаос. Зарисовки характерных голов чередовались с чертежами машин, механическими расчетами, описанием произведенных им опытов и разного рода заметками.

Иногда Леонардо делал выборки из этих беглых записей на больших листах, излагая исследование какого-либо вопроса. Эти рукописи в копиях распространялись среди инженеров и ученых его времени. Они, как доказа-



Рисунки Леонардо да Винчи, изучавшего возникновение подъемной силы при полете птицы.



Станок для насечки напильников, изобретенный Леонардо да Винчи.

ли позднейшие исследования, имели значительное влияние на современников Леонардо.

Изучая механические явления, Леонардо производил многочисленные опыты. На основе их результатов он делал математические расчеты. Как утверждал Леонардо, «никакой достоверности нет в науках там, где нельзя приложить ни одной из математических наук, и в том, что не имеет связи с числом».

На страницах его записных книжек не раз повторяется чертеж двусторонней наклонной плоскости с двумя грузами, связанными веревкой, переброшенной через блок. Наклон плоскостей и грузы различны: на более крутой — груз меньше, на пологой — больше.

Очевидно, что Леонардо хотел объяснить остававшееся загадкой действие наклонной плоскости. Хотя он и не решил теоретически эту задачу, но путем опыта пришел к важному выводу: если шар движется по наклонной плоскости, то его скорость во столько раз меньше скорости падения по вертикали, во сколько длина наклонной плоскости больше ее высоты.

Другой проблемой механики, занимавшей Леонардо, было равновесие коленчатого рычага. Размышляя над ней,

Леонардо впервые ввел в механику понятие, называемое в настоящее время моментом силы.

Допустим, что коленчатый рычаг вращается на шарнире в точке опоры. К концам его приложены две силы. Произведение силы на перпендикуляр, опущенный на ее направление из точки опоры, и есть момент силы.

Леонардо уже знал, что для равновесия коленчатого рычага необходимо, чтобы моменты приложенных к нему сил были равны. Этот вывод он сделал, правда не доказывая его.

Как бомбардир миланского герцога, Леонардо занимался и проблемой полета пушечного ядра. Он уже понимал, какое важное значение для решения ее имеет знание законов свободного падения.

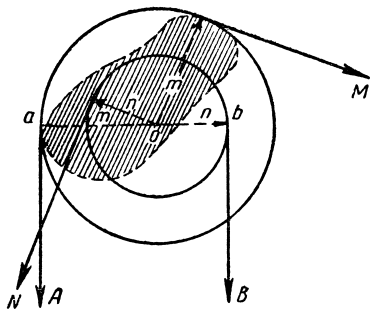
Размышляя над свободным падением тел, Леонардо пришел к мысли, что скорость их движения увеличивается в арифметической прогрессии. Однако законов свободного падения тел он не открыл.

К сожалению, рукописи Леонардо, рассеянные по частным библиотекам, были забыты. Его записные книжки пролежали около ста лет на чердаке одного дома, прежде чем стали известны ученым.

Когда наконец заметки и рукописи Леонардо были открыты, прочитать их оказалось нелегко: они были написаны справа налево, вероятно, чтобы скрыть их смысл от непосвященных.

Только разобрав заметки Леонардо, современные ученые поняли, каким гениальным исследователем природы был этот художник.

Обращение к опыту и наблюдению привело к развитию архимедовой статики. Итальянский геометр и механик Гвидо Убальди дель Монте (1545—1607) ввел новое понятие о «статическом моменте». Он рассмотрел равновесие двух сил, действующих по касательной



Вывод принципа статических моментов. На двойном блоке с радиусами m и n равновесие не нарушится, если величина сил обратно пропорциональна радиусам, то-есть

$$M : N = A : B = n : m.$$

к окружности двух неподвижных, скрепленных между собой блоков (силы направлены так, что стремятся вращать систему во взаимно противоположные стороны). Исходя из закона рычага, легко вывести, что по величине эти силы должны быть обратно пропорциональны радиусам блоков.

Когда эта система находится в равновесии, можно устранить ненужные части блоков, оставив лишь часть их тела (см. рисунок на стр. 63), к которой приложены силы. Для равновесия сил нужно, чтобы произведения величины каждой из сил на перпендикуляр, опущенный на ее направление из точки вращения, были равны.

Произведение силы на перпендикуляр из точки вращения тела получило название момента силы, а длина перпендикуляра — плеча силы.

Так был введен в механику принцип равенства статических моментов как условие равновесия сил, приложенных к телу, могущему вращаться около одной точки.

Развитие в механике экспериментального метода имело огромное значение для возникновения учения о движении тел.

Путь полета пушечного ядра

Одновременно с Леонардо да Винчи к опыту призывали и другие сторонники эксперимента. Их голоса не остались не услышанными современниками. Появилось много наблюдателей и экспериментаторов, не имевших связи с схоластической наукой. Правда, не многие из них правильно понимали, что такое научный опыт.

Одни годами просиживали в темных лабораториях, занимаясь алхимическими опытами. Другие трудились над изготовлением «живых» автоматов — голубей, уток. Даже прославленный в XVI веке математик Иероним Кардан (1501—1576) еще не видел в опытах воспроизведения в желаемых условиях физического явления.

Но всех этих «экспериментаторов» объединяла борьба с аристотелианством. И все они были убеждены в необходимости опыта для познания природы.

В XVI веке выдвинулись несколько исследователей, подготовивших почву для гениального основоположника современной динамики — Галилея.

Первым из них был Николай Тарталья (1499—1559).

Он родился в семье бедного содержателя станции почтовых лошадей. Не получив по бедности школьного образования, Тарталья овладел грамотой и началами математики собственными силами.

Однако его математические способности оказались так велики, что уже в возрасте двадцати лет он преподавал арифметику ремесленникам и купцам в Вероне.

В те времена в городах практиковали частные «арифметики», дававшие указания мастерам, инженерам, купцам, архитекторам — всем, кто не обладал достаточными математическими познаниями для решения разного рода практических задач.

Эту профессию выбрал для себя и молодой Тарталья. К нему обращались с вопросами, требовавшими знания математики. Он то выступал в качестве эксперта при расчетах между купцами, то преподавал им арифметику.

Занимаясь математикой, Тарталья нашел правило определения числа возможных комбинаций при бросании в игре костей. Позднее он решил кубическое уравнение.

В Вероне к Тарталье обратился старый опытный артиллерист с вопросом: под каким углом к горизонту нужно выстрелить из пушки, чтобы ядро пролетело наибольшее расстояние.

Ученые-аристотелианцы не могли бы правильно ответить на этот вопрос. Они были уверены, что, покинув ствол пушки, ядро движется «насильственно» по прямой линии. Когда же оно остановится, то падает «естественно» по вертикали вниз. Поэтому артиллеристы думали, что пушку нужно направлять прямо в цель, и, конечно, делали промахи.

Многие артиллеристы придерживались этого ошибочного мнения до середины XVI века.

Для решения вопроса, заданного Тарталье, необходимо знать форму траектории брошенного тела и исследовать ее свойства. Это было осуществлено позднее.

Но Тарталье все-таки удалось дать правильный ответ артиллеристу, что пушка должна быть направлена под углом 45° к горизонту. Этот случай навел его на размышления о полете пушечного ядра. Он стал упорно искать, по какому пути должно оно лететь.

Тарталья уже понимал, что сила тяжести действует на ядро с момента вылета его из пушки. Значит, она должна постоянно отклонять его от прямолинейного пути.

Но еще Аристотелю было известно, что тело может двигаться одновременно по двум различным направлениям. Поэтому ядро, отклоняемое тяжестью вниз, будет лететь по кривой. К такому выводу и пришел Тарталья.

Это было правильное, но приблизительное решение. Более точного Тарталья не мог найти, так как ему не были известны законы свободного падения тел, открытые лишь Галилеем. К тому же Тарталья еще не решался слишком резко противоречить аристотелианцам. Поэтому он признал, будто в начале полета ядро движется по прямой линии. Затем движение по прямой «смешивается» с падением вниз, и ядро описывает кривую. В конце же полета оно будто бы падает вертикально.

В то время Италии угрожали турки. Ожидалось нападение их флота. Тарталья хотел помочь своим соотечественникам в предстоящей борьбе, научив их искусству правильно наводить орудия.

«Мне представляется предосудительным, — писал Тарталья, — скрывать долее эти вещи; и потому я решил ознакомить с ними — частью письменно, частью устно — каждого истинного христианина, чтобы каждый был лучше вооружен как для нападения, так и для защиты».

Свои знания о траектории пушечного ядра Тарталья изложил в сочинении «Новая наука», изданном в 1537 году в Венеции.

«Новая наука» была первым трудом, посвященным исследованию движения брошенного тела. Этот труд был написан на разговорном итальянском языке, доступном широкому кругу читателей. Им пользовались артиллеристы до конца XVI века.

Сочинение Тартальи прославило его имя по всей Италии. У него появились последователи, развивавшие его идеи.

Талантливейшим из учеников Тартальи был Джиованни Бенедетти (1530—1590). Как и его учитель, Бенедетти не получил школьного образования. Изучив под руководством Тартальи геометрию Евклида, он самостоятельно продолжал занятия математикой. В этой науке он приобрел большие познания и поступил на службу в качестве придворного математика к герцогу Савойи.

Бенедетти был смелым борцом с аристотелианством. Он прямо заявлял, что учение Аристотеля о движении тел ошибочно: брошенный камень движется не под влиянием

толчков воздуха, врывающегося в образующуюся пустоту, как утверждал этот философ. Воздух, по мнению Бенедетти, задерживает, а не подталкивает брошенный камень.

Бенедетти утверждал, что брошенный камень обладает «стремительностью», заставляющей его двигаться. По видимому, он уже имел некоторое, хотя и неясное, представление об инерции движущихся тел.

Вопреки учению Аристотеля, будто скорость свободно падающего тела зависит от его веса, Бенедетти указывал, что опыт противоречит этому мнению. Он также доказывал, что при свободном падении тела его «стремительность» постоянно нарастает. Поэтому тело движется все быстрее.

В конце жизни Бенедетти издал сочинение, в котором изложил свои воззрения на движение тел. Как противоречащее общепринятому тогда аристотелианству, оно замалчивалось учеными-схоластами. К тому же Бенедетти, выступая на диспутах при дворе герцога савойского, прославился как искусный диалектик. Поэтому спор с ним не обещал ничего хорошего его противникам.

Тарталья и Бенедетти только подготовили почву для возникновения динамики, созданной в начале XVII века Галилеем. Сами они не могли заложить основ этой науки: для этого было необходимо сочетание математических знаний с большим талантом экспериментатора.

Стремление к познанию действительных законов движения повлияло и на представление о строении мира.

Система мира Коперника

Движение планет по эпициклам вокруг ничем не отмеченных в пространстве центров не могло быть понято с механической точки зрения. Некоторые астрономы пришли к мысли, что действительные движения планет непознаваемы.

Между сторонниками Птолемея и Аристотеля шла борьба. Одни видели спасение в возвращении к твердым сферам, другие возражали, что только схема Птолемея дает возможность предвычислять положение планет.

Но все держались единого мнения, будто Земля — неподвижный центр вселенной. Поэтому планетам приписы-

вались самые удивительные движения, чтобы объяснить их видимые перемещения среди звезд.

Только в XVI веке выступил против этого ложного мировоззрения гениальный мыслитель и астроном Николай Коперник (1473—1543).

Сын крупного польского купца в Торуні (Торн), на берегу Вислы, в церковной области Вармии, Коперник получил хорошее домашнее образование, которое он продолжал в Краковском университете. В Кракове он изучал астрономию у профессора Брудзевского, а позднее производил под руководством искуснейших специалистов астрономические наблюдения в Болонье. Свое высшее образование он закончил в университете Падуи.

В те времена университеты католических стран находились под контролем церкви. Никаких сомнений в справедливости идеи о центральном положении во вселенной и о неподвижности Земли не допускалось. Но вне университетов находились ученые, не только сомневавшиеся в этом, но и решавшиеся высказывать свои мысли.

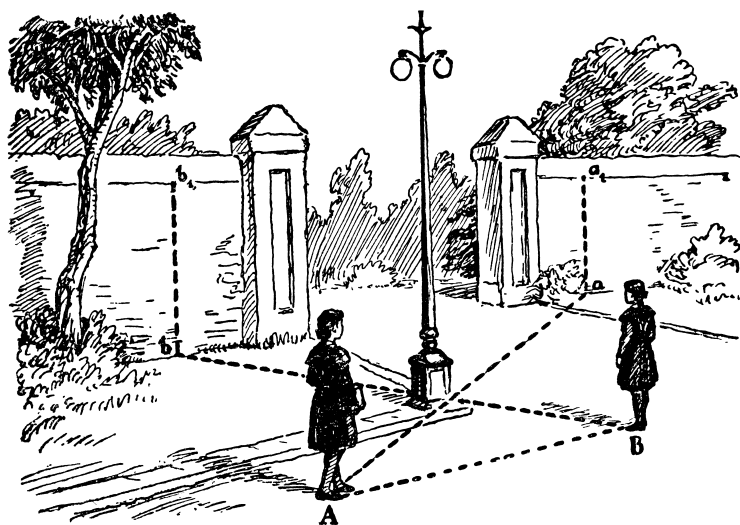
Еще в Италии Коперник познакомился с учением древнегреческого астронома Аристарха Самосского (конец IV — начало III века до н. э.) о движении Земли вокруг Солнца. Копернику были известны и представления об относительности движений, возникшие среди ученых XV века. Он стал размышлять над проблемой строения мира.

По возвращении на родину Коперник был избран на должность каноника собора в Фромборке — главном городе Вармии.

Не ограничиваясь исполнением несложных обязанностей, связанных с этой службой, Коперник принимал деятельное участие в политической и общественной жизни своей страны. Но он не прерывал и своих исследований движения планет.

В 1515 году Коперник написал уже «Малый Комментарий», в котором были изложены основные идеи его учения.

Основой системы Коперника было утверждение, что сложность видимого перемещения планет зависит от движений самой Земли. Вот что писал он позднее об относительности движений: «...Всякое видимое изменение положения происходит вследствие движения наблюдаемого предмета или наблюдателя или же вследствие пере-



При переходе наблюдателя с одного места на другое кажется, что фонарный столб переместился на фоне стены. Это — кажущееся (параллактическое) перемещение.

мещения, разумеется не одинакового, их обоих. Ибо при равном движении того и другого, то-есть наблюдаемого и наблюдателя, в одном и том же направлении движение незаметно. Но Земля есть то место, с которого мы наблюдаем небосвод, откуда он открывается нашему взору. Следовательно, если предположить какое-нибудь движение у Земли, оно непременно будет обнаруживаться во внешних частях вселенной, но как идущее в обратном направлении, как бы мимо Земли. Таково, прежде всего, суточное обращение.

Из этого положения и исходил Коперник, формулируя в «Малом Комментарий» свои «аксиомы»:

1. Центр Земли не есть центр вселенной, а только центр лунной орбиты.

2. Все планеты обращаются вокруг Солнца как их центра. Солнце является центром вселенной.

3. Расстояние Земли от Солнца во столько раз меньше расстояния Земли до неподвижных звезд, во сколько радиус Земли меньше ее расстояния от Солнца: оно ничтожно по сравнению с дальностью звезд.

4. То, что кажется нам движением небесного свода, есть результат движения самой Земли. Земля вместе с окружающим ее воздухом оборачивается раз в сутки вокруг самой себя.

5. То, что кажется нам передвижением Солнца среди звезд, есть следствие движения Земли, которая обращается вокруг Солнца, как всякая другая планета.

6. Видимые нами прямые и обратные движения планет проистекают не от их собственных движений, но из-за движения Земли. Таким образом, достаточно движений Земли, чтобы объяснить многообразие большого ряда небесных явлений.

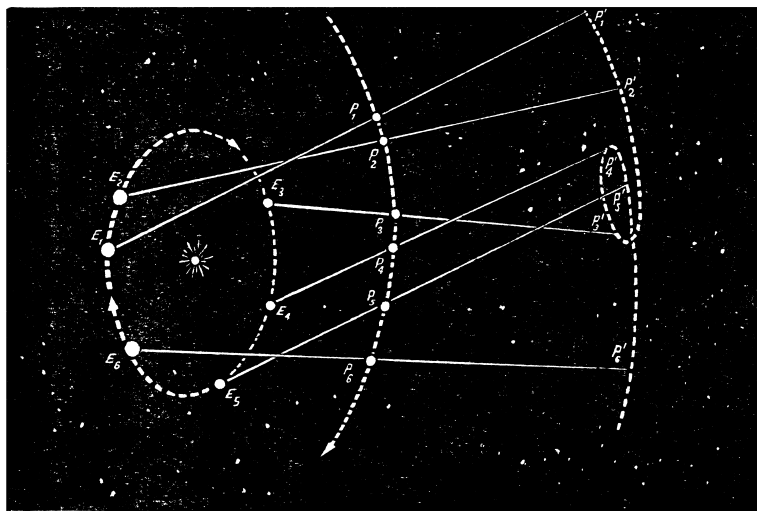
Работая позднее над своим капитальным трудом, Коперник положил в его основу аксиомы «Малого Комментария». Весть об этом труде распространилась среди молодых университетских ученых, у которых возник интерес к идеям Коперника.

К великому мыслителю приехал двадцатичетырехлетний профессор математики Виттенбергского университета Георг Ляухен, известный под именем Ретика (1514—1576).

Ретик основательно изучил систему Коперника и в 1540 году издал небольшую брошюру с изложением новой астрономической теории. Брошюра была доступна широкому кругу образованных людей. Она привлекла внимание к новому учению также астрономов и математиков и подготовила почву для появления капитального труда самого Коперника. Этот труд вышел в 1543 году под заглавием «Об обращении небесных сфер» с девизом на титульном листе: «Да не входит никто, не знающий математики», так как этот труд предназначался для ученых.

По учению Коперника, суточное движение светил — кажущееся явление, происходящее от вращения самой Земли. Действительные движения планет, наблюдаемые с Земли, искажаются кажущимися перемещениями, происходящими вследствие обращения ее вокруг Солнца. «Петли» планет — это отражение собственного кругового движения Земли.

Как указывал Коперник, «петли» видимого движения Марса, как более близкой планеты, должны быть больше, чем у Юпитера, а «петли» Юпитера больше, чем у еще более далекого Сатурна. Они видны с Земли под теми углами, под которыми с этих планет видна орбита Земли.



Параллактическое перемещение планеты, наблюдаемой из разных точек земной орбиты. E_1, E_2, \dots, E_6 — положение Земли; p_1, p_2, \dots, p_6 — положение планеты; p'_1, p'_2, \dots, p'_6 — проекция планеты на небесную сферу.

Эти углы в небольших пределах пропорциональны расстояниям планет от Земли. Таким образом, представилась возможность найти относительное расстояние внешних планет от Солнца в радиусах земной орбиты.

Правда, Коперник не мог еще опровергнуть возражений против движения Земли с точки зрения механики. В этом отношении он сам стоял еще на позициях Аристотеля. Однако он отвергал утверждение Птолемея, будто при вращении Земля должна бы рассеяться в пространстве. Коперник указывал, что при вращении вселенной ей угрожала бы еще большая опасность, так как линейная скорость вращения звездной сферы была бы неизмеримо большей, чем у Земли.

Поразительная простота системы Коперника привлекала астрономов. Но учение Коперника угрожало религии, признавшей за истину библейские примитивные взгляды на строение мира. Лишая Землю исключительного положения во вселенной, учение Коперника открывало путь предположению о множественности обитаемых миров.

Церковники упорно боролись с распространением этого учения, подрывавшего веру в библейские легенды. Они преследовали сторонников Коперника, решавшихся открыто защищать его учение.

Первая половина XVII века была эпохой жесточайшей борьбы за систему Коперника.

Борьба за учение о движении Земли

Гениальная идея Коперника, «толкнувшего» Землю в мировое пространство, нашла последователей. Одним из первых среди них был итальянский философ Джордано Бруно (1548—1600).

Бруно, воспитанный в доминиканском монастыре, должен был стать монахом. Но, познакомившись с учением древних философов-материалистов и с трудом Николая Коперника, он сделался ярким врагом аристотелианства. Не стеснявшийся высказывать открыто свои взгляды, Бруно скоро был вынужден бежать из Италии от преследования инквизиторов.

Он побывал в Швейцарии, Франции, Англии и Германии, пропагандируя учение о движении Земли.

В Лондоне Бруно выступал с лекциями, развивая свои воззрения на строение мира. В 1584 году он издал свое знаменитое сочинение «О бесконечности вселенной и мирах», написанное в форме диалога, чтобы сделать его доступным для широких масс.

На диспутах, в лекциях и в своих сочинениях Бруно защищал взгляд на Землю как на одну из планет, обращающихся вокруг Солнца.

Бруно не был геометром. Движение Земли он признавал не потому, что с помощью этого предположения легко объясняются перемещения планет среди звезд. Но система Коперника была для него исходным представлением о строении вселенной.

Бруно учил, что человечество должно отказаться от веры, будто бы оно представляет собой цель существования вселенной. Нелепо думать, что для него светят Солнце, Луна и звезды: земной мир — только ничтожная пылинка в бесконечности пространства.

«Почему я могу знать, — говорил один из собеседников диалога «О бесконечности вселенной и мирах», — что не-

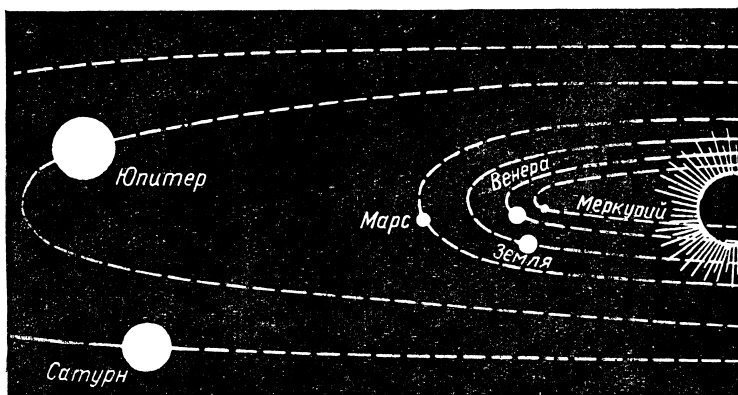


Схема строения мира по Копернику.

бесные тела действительно движутся по кругам около Земли, а не Земля движется по кругу? Находящемуся на корабле кажется, что берег движется, а корабль стоит... То, что наблюдение показывает мне с Земли на других телах, не должно ли с других тел представляться на Земле?»

«Разбивая» звездную сферу, Бруно далеко опередил Коперника. Он уже отрицал, что вселенная ограничена этой сферой. Своими блестящими лекциями он увлекал молодежь.

Однако старые университетские ученые холодно встречали ниспровержение системы Птолемея. Они повсюду — в Англии, Франции, Германии — делали невозможным длительное пребывание Бруно.

После долгих лет скитаний по Европе Бруно возвратился в Италию. В Венеции он был схвачен в 1592 году инквизицией, заключен в тюрьму и в 1600 году публично сожжен в Риме.

Ужасная смерть Бруно не устрасила последователей Коперника. Современник Бруно — итальянский ученый Галилео Галилей (1564—1642) продолжал борьбу против схоластов и занимался популяризацией учения о движении Земли.

Галилей был сыном флорентийского дворянина. Его отец, Винченцо, как и многие другие итальянцы того времени, любил искусство и науку. Он написал сочинение по

истории музыки. Ему принадлежали работы по теории музыки.

С юных лет Галилей вращался в обществе друзей своего отца — знатных флорентийцев, увлекавшихся музыкой и наукой. Об учении Галилея и его исследовании законов движения тел будет идти речь в следующей главе. Здесь же скажем только о его астрономических открытиях.

Поехав в 1609 году в Венецию, Галилей услышал там, будто в Голландии какой-то оптик сделал зрительную трубу, приближающую далекие предметы. Возвратившись в Падую, Галилей стал испытывать различные комбинации оптических стекол. Скоро ему удалось построить зрительную трубу с увеличением в тридцать раз.

Заслуга Галилея заключалась не в изобретении зрительной трубы, а в применении ее для наблюдения неба. Направив свою трубу на небо, Галилей сделал много удивительных открытий.

Все планеты, в отличие от звезд, в поле зрения трубы имели диски, подобные Луне. Это давало возможность сделать заключение, что планеты — темные тела, освещенные лучами Солнца.

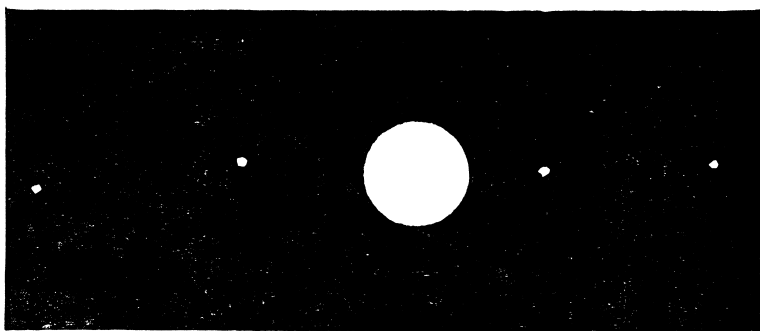
У Юпитера оказалось четыре спутника, которые следуют за ним в его обращении вокруг Солнца так же, как Луна следует за Землей.

Светлые туманные пятна Млечного Пути в поле зрения трубы разлагались на множество звезд.

В своем сочинении «Звездный вестник», вышедшем в 1610 году, Галилей сообщил о неровной поверхности Луны, о дисках планет, отличающих их от звезд, и неизвестных ранее спутниках Юпитера. Несколько позднее он сообщил об открытии фаз Венеры и пятен на Солнце. Эти сообщения произвели потрясающее впечатление на современное ему общество. Они привлекли необычайное внимание широких кругов. Стало очевидным, что планеты — тела, подобные Земле.

Галилей выступал с публичными разъяснениями о значении своих астрономических открытий. Он говорил и писал на всем понятном итальянском языке и привлекал внимание многочисленных слушателей и читателей к идее о движении Земли.

В 1613 году Галилей опубликовал три письма о солнечных пятнах и фазах Венеры. В этих письмах он откры-



Юпитер со спутниками в поле зрения трубы Галилея.

то признал себя последователем учения Коперника. Идеи Коперника, изложенные в трудном математическом сочинении, разъяснялись и подтверждались новыми, неожиданными открытиями Галилея.

Лекции и сочинения Галилея возбудили беспокойство церковников. Многочисленные противники Галилея ополчились против него. Они опровергали идею о движении Земли цитатами из библии и Аристотеля. Иные даже отрицали открытия, сделанные ученым с помощью телескопа.

Бессильные опровергнуть сообщения Галилея, церковники донесли на него инквизиторам. Но Галилей, узнав об этом, поехал в Рим. Там он встречался со схоластами и вступал с ними в споры о строении мира, удивляя присутствовавших убедительностью своих доводов. Галилею удалось опровергнуть возведенное на него обвинение в «ереси». Но уже тогда кардиналы предупредили Галилея, чтобы он впредь не защищал ни словесно, ни письменно учение Коперника. В противном случае ему угрожало преследование инквизиции.

Прекратив публикацию своих астрономических открытий, Галилей стал работать над большим трудом — «Диалог о двух системах мира». Главной целью этого сочинения было доказательство движения Земли.

«Диалог» представляет собой беседу трех лиц: противника учения Коперника аристотелианца Симплицио, Сальвиати, устами которого говорил сам Галилей, и знатного флорентийца Сагредо.

Обсуждая вопрос о движении Земли, Симпличио говорит: «...принимая учение Коперника, необходимо отрицать чувственное восприятие и сильнейшие ощущения, которые имели бы место» при движении Земли.

На это Сальвиати возражает: «Вы ведь, синьор Симпличио, я полагаю, тысячу раз плавали в лодках из Падуй и по совести признаете, что никогда не ощущали в себе причастности такому движению, за исключением тех случаев, когда лодка, садясь на мель или наталкиваясь на какую-нибудь преграду, останавливалась и вы с другими пассажирами, захваченные врасплох, рисковали упасть. Следовало бы и земному шару встретиться с каким-нибудь препятствием, которое его остановило бы, потому что, уверяю вас, тогда вы заметили бы импульс, пребывающий в вас, поскольку он отбросил бы вас к звездам».

Продолжая свою речь, Сальвиати указывает, что движение Земли может быть замечено зрением: «Вы можете заметить движение лодки, а именно посредством зрения, смотря на деревья и здания, находящиеся на берегу: они, отделенные от лодки, кажутся движущимися в противоположную сторону; если посредством такого опыта вы хотите удостовериться в земном движении, то я советую вам посмотреть на звезды, которые благодаря этому кажутся вам движущимися в противоположную сторону».

«Диалог» должен был доказать правоту учения о движениях Земли. Всем должно было стать ясным, что Земля — такое же движущееся космическое тело, как Луна, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн.

Это сочинение, вышедшее в свет в 1632 году, привело в ярость богословов.

Галилей был вызван в Рим на суд инквизиторов. Ему было предъявлено обвинение, что он «верил и поддерживал учение, ложное и противное святому божественному писанию».

Угрожая Галилею пыткой, вслед за которой его ожидало сожжение живым на костре, инквизиция потребовала публичного отречения от учения Коперника. Больной, семидесятилетний Галилей покорился и подписал отречение от мнения, что «Солнце есть центр мира и недвижно, Земля же не центр и движется».

Последние годы Галилей должен был провести в своем сельском домике под надзором инквизиторов. Он не



Галилей перед судом инквизиторов.

имел права издавать никаких астрономических сочинений. В этот период своей жизни Галилей возвратился к временно прерванным занятиям механикой.

Ниспровержение аристотелианства

Интерес к астрономическим открытиям и системе мира Коперника охватил в XVI веке широкие слои общества в Италии. Шли оживленные разговоры не только во дворцах герцогов, но и в мастерских художников и ремесленников. По вечерам на паперти собора во Флоренции сходились врачи, учителя, аптекари, ремесленники, художники, чтобы беседовать о новостях литературы и науки.

Хотя прошло всего несколько лет после выхода в свет (и к тому же на латинском языке) бессмертного труда Коперника, а его идея уже обсуждалась флорентийцами.

Одним из постоянных собеседников того времени, собиравшихся на соборной паперти Флоренции, был маэстро Антонио, известный своим согражданам под шутливым прозвищем «Карафулла».

Часто возникал спор о том, неподвижна ли или движется Земля. В этих случаях Карафулла защищал мнение о движении ее, приводя самые невероятные, иногда даже шутливые доказательства. Он говорил, например, будто океанские приливы и отливы — это «колыхание» водных масс, вызываемое движением Земли.

Не только строение мира — вопросы механики также живо интересовали ремесленников и мастеров Италии. Поэтому нет ничего удивительного, что недовольные схоластикой простые люди стали объединяться в свободные научные общества и кружки.

Первый такой кружок — «веселая бригада» — образовался в 1540 году в той же Флоренции. Члены этого кружка приняли шутивное прозвище — «Мокрые».

Один из основателей кружка, аптекарь Граццини, был известен как автор популярных новелл и комедий. Другой, сапожник Джелли, слыл большим знатоком философии, но врагом латыни. К ним присоединился прославленный в XVI веке математик Козимо Бартоли.

Члены кружка начали делать переводы литературных произведений и ученых трудов на разговорный итальянский язык.

Герцог Тосканы заинтересовался их работой. Он надеялся получить от кружка помощь в решении вопросов строительства и военного дела. Чтобы облегчить кружку его работу, герцог присвоил ему наименование «Флорентийской академии», а президент «академии» был поставлен одновременно во главе университета.

«Флорентийская академия» занялась популяризацией науки. Члены ее читали общедоступные лекции по физике, механике, астрономии и другим отраслям знания.

«Нужно снять у народа с носа синие очки, надетые ему учеными-латинистами и рисующие ему ложную и искаженную картину мира, — говорил Джелли. — Новооснованная академия сорвет с них всех маску».

Не только непонятная народу латынь ставилась в вину университетам. Члены «академии» указывали на отсутствие связи между университетской наукой того времени и потребностями техники, на господство неверных

мнений признанных авторитетов, на отсутствие их проверки экспериментом.

Один из видных флорентийских академиков, Бенедетто Варки, писал: «Хотя у современных философов в обычае верить всему, что написано у хороших авторов и особенно у Аристотеля, и никогда этого не доказывать, но было бы не менее надежно и интересно идти другим путем и в обоих случаях иногда нисходить до опыта, например в вопросе о движении тел. Аристотель и все остальные философы без всяких колебаний верили и утверждали, что тело тем скорее падает, чем оно тяжелее, между тем как опыт доказывает, что это неверно».

В призывах к опыту, в стремлении познакомиться с наукой широкие массы состояла заслуга этого флорентийца.

Вскоре стали возникать подобные «академии» и в других городах Италии. В них объединялись также люди, не имевшие отношения к схоластической науке. Деятельность этих свободных научных кружков сыграла важную роль в развитии механики.

Наука университетов первой половины XVI века продолжала оставаться далекой от практической жизни. Студенты изучали философские труды Аристотеля и Платона. Технические науки вовсе не входили в программу университетов. Во многих университетах того времени не преподавались ни математика, ни механика. Эти науки нашли приют в «академиях». Оттуда раздавались призывы следовать «указаниям самого Аристотеля», признававшего важность опыта для познания природы.

Во второй половине XVI века промышленность некоторых стран уже сделала большие успехи. Все более усиливалась буржуазия — владельцы промышленных предприятий и купцы, — боровшаяся с феодализмом. Она поддерживала нужное для промышленности экспериментальное направление в науке.

Церковь защищала феодализм, гибель которого грозила ей потерей привилегий. Она боялась духа исследования, охватывавшего широкие массы. Одно из средств поддержания феодализма церковники видели в схоластике, отвлекавшей умы людей от изучения природы.

Но уже поднималась волна возмущения против пленения умов аристотелианством. Все смелее и громче звучали голоса против него.

Около середины XVI века в Англии, быстрее чем в других странах, начал развиваться капитализм. Буржуазия приобрела большое влияние. Она стремилась порвать со средневековой схоластикой.

Ярким выразителем нарождавшегося мировоззрения явился английский философ Фрэнсис Бэкон (1561—1626). Ловкий царедворец, Бэкон сделал блестящую карьеру. Он достиг поста лорда-канцлера и получил звание барона Веруламского.

Несмотря на занятость государственными делами, Бэкон нашел время написать и издать прославившее его сочинение «Новый Органон». Это сочинение он противопоставил сочинению Аристотеля «Органон».

Бэкон был ярким врагом Аристотеля и других натур-философов, учение которых основывалось на умозрениях. Он призывал к экспериментированию в исследовании природы. Осуждая сторонников умозрительного метода, переоценивавших разум человека, он писал: «Тонкость природы неизмеримо превосходит тонкость наших чувств и нашего ума, так что все эти прекрасные созерцания, размышления, толкования — бессмысленная вещь».

Но Бэкон далек от грубого эмпиризма. Он требует, чтобы результаты опыта и наблюдений служили лишь материалом для логических выводов. «Те, кто занимались науками, — писал он, — были или эмпириками, или догматиками. Эмпирики, подобно муравью, только собирают и пользуются собранным. Рационалисты, подобно пауку, из самих себя создают ткань. Пчела же избирает средний способ: она извлекает материал из цветов сада и поля, но располагает и изменяет его собственным умением».

Ф. Бэкон не знал математики — могущественного метода обработки наблюдений и результатов опытов. Несвойственен был ему и талант экспериментатора. Поэтому сам он не двинул вперед науку о природе. Но призыв к эксперименту имел тогда огромное значение. Вот почему Бэкон признан родоначальником английского материализма и вообще опытных наук новейшего времени.

Бэкон ниспровергал в глазах общества того времени умозрительный метод аристотелианцев. Он указывал на огромные успехи техники и бесплодность схоластики.

Союзником Бэкона в борьбе с аристотелианством выступил его современник — французский философ, физик и математик Ренэ Декарт (1596—1650).

Дворянин, воспитанник иезуитской школы, Декарт в молодости вел рассеянный образ жизни. Он много путешествовал, принимал участие в Тридцатилетней войне. Однако, увлекшись философией, Декарт оставил военную службу и поселился в Голландии, чтобы полностью отдаться размышлению. Он умер в Стокгольме, куда переселился в конце жизни.

Обладавший большими средствами к жизни, Декарт вел дружбу с ремесленниками, мелкими промышленниками и купцами. Он учил математике, астрономии и механике этих простых людей и своих слуг. Один из таких его учеников был приглашен в качестве профессора физики и математики в Лувенский университет. Сапожник Рембранц стал астрономом, а слуга Декарта, по имени Жилло, — искусным математиком, помогавшим самому Декарту в решении трудных математических задач.

Размышляя над проблемами механики, Декарт обращался к опыту инженеров, ремесленников и вообще практиков. «Мне казалось, — писал он, — что я мог встретить гораздо больше истины в рассуждениях, которые каждый делает о делах, непосредственно его касающихся, и результат которых, в случае ошибки, немедленно должен его наказать, чем в кабинетных рассуждениях ученого».

Декарт был выдающимся математиком. Он создал новую науку — аналитическую геометрию, объединившую анализ и геометрию. Эта наука способствовала развитию механики, так как позволяла аналитически изучать кривые линии, описываемые движущимися материальными точками.

В своих воззрениях на мир Декарт был материалистом. Он утверждал, что мир — пространство, сплошь заполненное материей (веществом). Эта материя охвачена вихреобразным движением, служащим причиной обращения планет и всех явлений природы. В мире нет ничего, кроме движущейся материи. Поэтому все происходящее в нем подчинено законам механики.

Декарт отвергал твердые планетные сферы древних греческих астрономов. Он объяснял движение планет вокруг Солнца тем, что они увлекаются вихрями межпланетной материи («эфира»), кружащимися около центрального светила нашей планетной системы.

Грандиозность этой картины поразила ученых того времени. Физики, астрономы стали последователями уче-

ния Декарта о «вихрях», движущих планеты вокруг Солнца.

Но, обладая большим математическим дарованием, Декарт не приложил его к разработке теории своих вихрей. Он удовольствовался построением общей картины мира, не отыскивая управляющих им законов.

Подобные гипотезы носят в науке название «качественных», в отличие от количественных построений, которые только и могут удовлетворить современного ученого. Вихри Декарта были забыты, но его материалистические взгляды оказали сильное влияние на развитие естествознания.

Как механик Декарт не признавал существования в природе сил. Он утверждал, что не силы двигают материю, а извечно присущее частицам материи движение проявляется как сила. Именно материи, по выражению К. Маркса, Декарт приписывал творческую силу.

Декарт не сделал открытий в механике. Он даже не признал законов динамики, выведенных Галилеем. Но его воззрения на природу силы до настоящего времени привлекают большое внимание физиков.

Галилей — основоположник динамики

Для введения экспериментального метода в механику было недостаточно лишь сознания его необходимости. Требовалось не только уметь ставить опыты, но и выводить из них теоретические правила — законы. Вывод законов мог быть сделан путем математической обработки результатов экспериментов.

В XVI веке в Италии уже работало много математиков — последователей Тартальи. Эти ученые обладали достаточными познаниями для вывода законов механики. Но они не были экспериментаторами и не могли дать новое направление этой науке. Делавшие же опыты художники, техники и ремесленники не обладали систематической научной подготовкой. Поэтому и они также не были в состоянии из результатов своих опытов выводить общие законы.

Только гениальному Галилею, обладавшему талантом экспериментатора и математическими познаниями, удалось заложить основы учения о движении — динамики.

В детстве Галилей увлекался изготовлением действующих моделей машин и игрушек. Уже тогда он проявил большие способности. Видя это, его отец изменил свои намерения в отношении будущего Галилея: вместо торговой конторы он отдал его в Пизанский университет.

Галилей принялся усердно за изучение физики по Аристотелю, астрономии — по Птолемею, геометрии — по Евклиду. По выходе из университета он должен был стать врачом.

Но схоластическое естествознание было основано на безусловном признании мнений авторитетов. Оно исключало самую возможность критики, если даже она исходила из результатов опыта и наблюдений.

Исследовательский дух Галилея не мог примириться с мертвой схоластикой. Незадолго до окончания университета Галилей в возрасте двадцати лет оставил его.

Галилей чувствовал большой интерес к технике, к прикладной математике и к механике. Эти науки не преподавались в университетах. С ними Галилей мог познакомиться только в Художественной академии, бывшей одновременно и высшей технической школой. Он стал посещать лекции в академии и брал частные уроки механики и прикладной математики.

Учителем Галилея был математик школы Тартальи — Остилио Риччи, преподававший прикладную математику молодым людям. Он решал со своим учеником задачи, встречающиеся в практической деятельности инженеров, артиллеристов и других техников.

Стремление связать теорию с практикой было отличительной чертой Галилея как ученого. Поэтому, оставив оторванную от жизни схоластику, Галилей охотно взялся за изучение прикладной математики.

Образование, полученное Галилеем под руководством Риччи, вполне соответствовало духу, господствовавшему в академиях и среди художников-инженеров той эпохи.

Галилей близко познакомился с проведением каналов, подъемными машинами, регулированием рек и другими вопросами практической гидравлики. Он, повидимому, участвовал в наблюдении за работами по сооружению крепостей, по постройке мостов и водопроводов.

Эти занятия вполне отвечали наклонностям Галилея, который и в дальнейшем в течение всей своей научной деятельности занимался практической техникой. Сделан-

ные Галилеем записи лекций Риччи свидетельствуют, что эти лекции определили, по крайней мере вначале, деятельность его ученика.

В 1586 году Галилей построил чувствительные и точные гидростатические весы для определения относительной плотности тел. В небольшой работе он описал эти весы и способ их применения, проявив стремление к необычной для того времени точности.

Тогда же Галилей собирался написать «несколько книг для солдат, чтобы не только познакомить их с теорией, но и сообщить им также точные познания обо всех заслуживающих внимания, зависящих от математики вопросах, как, например, о технике рытья окопов, боевого строя, возведения крепостей, топографических съемок, артиллерийской техники и т. п.».

Как техник Галилей выступил с изобретенным им прибором для топографических съемок, приспособленным для военных целей.

Но интересы Галилея не исчерпывались практической техникой. С самого начала своей деятельности он отдавал много времени и сил теоретическим исследованиям.

Для Галилея была характерна его способность от вопросов техники переходить к глубоким теоретическим соображениям. В отличие от его предшественников и современников, у него теория всегда получала перевес над техникой.

Первой его теоретической работой было исследование о центре тяжести тел, написанное вскоре же после начала изучения им математики. В этой работе Галилей показал себя хорошим геометром. Его исследование в духе статики Архимеда обратило на себя внимание упомянутого ранее геометра Гвидо Убальди дель Монте.

Этот ученый очень знатного происхождения пользовался большим влиянием. По его рекомендации Галилей в возрасте двадцати пяти лет был приглашен на должность профессора в университет Пизы, покинутый им для занятий математикой. Он должен был преподавать студентам элементарную геометрию по Евклиду и излагать школьную астрономию по Птолемею.

Понятно, что эти занятия не увлекали Галилея. Все интересы великого ученого уже тогда сосредоточились на механике. Равновесие и движение тел — вот над чем размышлял молодой Галилей в свободное время.

Чтобы найти законы движения, например свободного падения тел, нужно было оторваться от представлений статики. Динамика была новой областью исследования. Общепринятое тогда деление движений на «естественные» и «насильственные» только затуманивало вопрос о движении тел.

Став открытым противником механики Аристотеля, Галилей приобрел много врагов. Профессора Пизанского университета увидели в нем опасного противника схоластики. Они создали невыносимую для Галилея обстановку, и молодой ученый должен был оставить университет Пизы, хотя срок его договора еще не истек.

Тогда покровительствовавший Галилею Убальди дель Монте помог ему перейти в 1592 году в университет Падуй.

В этом городе Галилей продолжал как свои теоретические исследования, так и занятия техникой. Он устроил там мастерскую, в которой изготовлял различные приборы и инструменты. Желая изучать технические науки он преподавал искусство сооружения крепостей, баллистику и топографическую съемку.

От практических вопросов баллистики Галилей перешел к теоретическим исследованиям движения тел.

В Падуе Галилей начал свою раннюю работу — «О движении», в набросках к которой отразилось негодование молодого исследователя по поводу невежества его противников. Да и сам Галилей, получивший схоластическое образование, еще испытывал затруднения в изложении своих идей.

Но позднее, работая над сочинением «Учение о движении под действием тяжести», законченным в 1609 году, Галилей уже показал себя замечательным исследователем. В этой работе он изложил и результаты своих наблюдений над падением тел, сбрасываемых с высоты.

Даже в этих ранних работах Галилей полностью отказался от умозрительных методов аристотелианцев.

«Мы будем, — писал он, — пользоваться таким методом, чтобы требующее доказательства выводилось из доказанного; и я никогда, если будет возможно, не буду класть в основу то, что еще нужно доказать, а лишь истинное».

Это метод математики. Сам Галилей говорил, что он заимствовал его у своих учителей-математиков. Иронизи-

руя над университетскими схоластами, он указывал, что математическим методом «недостаточно пользуются некоторые философы... преподавая элементы физики, кладут в основу то, что сказано или в книгах о душе, или в книгах о небе, или даже в метафизике... и выводят свое учение не из того, что хорошо известно, а попросту из неизвестного и неслыханного».

Галилей был гораздо более опасным врагом схоластов, чем эмпирики — художники и техники, признающие опыт единственным источником познания. Он обладал основательным знанием аристотелианской физики. По его собственным словам, изучению схоластической физики он посвятил больше дней, чем математике часов. Поэтому, выступая против схоластов, он мог наносить удары их же собственным оружием.

Вместе с этим Галилей был ярким представителем нового мировоззрения: в отличие от Аристотеля, он хотел знать, не «почему», а «как» движутся тела.

Галилей не ставил и не пытался разрешать философских вопросов о природе движения, пространства и времени. Он был прежде всего механик и математик и с такой точки зрения изучал движение.

Обладея редким талантом экспериментатора, Галилей искал приложимых к технике результатов исследования, а не отвлеченного знания. Ему было важно предсказать, по какому пути, с какой скоростью и какое расстояние пройдет движущееся тело в определенный промежуток времени.

Галилей понимал, что тело движется под действием сил природы. Движение зависит как от самого тела, так и от действующей на него силы. А свойства тел и сил природы, конечно, можно постичь только из наблюдений и опыта.

В упомянутых выше ранних трудах Галилея уже были заложены основы динамики. Но ему не удалось тогда опубликовать эти работы. Позднее же, после астрономических открытий 1610 года, Галилей надолго посвятил свое время защите идеи о движении Земли.

Только после осуждения Галилея в 1633 году инквизиторами, лишившего его возможности продолжать борьбу за идеи Коперника, он снова обратился к механике.

В уединении заключения Галилей написал свой знаменитый труд — «Беседы и математические доказательства

о двух новых науках», — изданный в Лейдене в 1638 году. В этот труд вошли не только результаты его более ранних исследований в Пизе и Падве о движении, но и размышления о строении вещества и причине твердости тел.

Хотя в то время физика была еще далека от знания молекулярного строения вещества и действующих между молекулами сил, но Галилей высказал некоторые ценные мысли. Как всегда, и в этих размышлениях Галилей шел от вопросов техники, которые возникали у него при работе в мастерской.

При жизни Галилей прославился своими астрономическими открытиями. Но в наше время уже по достоинству оценены его гениальные исследования в механике. Именно на это указал знаменитый французский механик XVIII века Лагранж, сказав, что «открытие спутников Юпитера, фаз Венеры, солнечных пятен и так далее потребовало лишь наличия телескопа и известного трудолюбия, но нужен был необыкновенный гений, чтобы открыть законы природы в таких явлениях, которые всегда пребывали перед глазами, но объяснение которых всегда ускользало от изыскания философов».

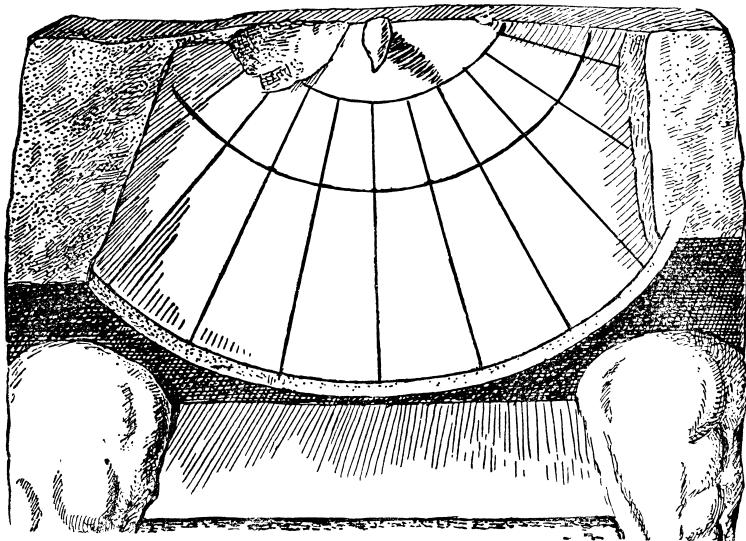
Открытие равномерности колебаний маятника

Несомненно, что с древнейших времен люди были знакомы с колебаниями подвешенных тяжестей. Например, моряки часто наблюдали, как колеблется подвижный блок, который спускают сверху, чтобы захватить корабельную снасть. Но ученые долго не интересовались законами колебаний. Впервые изучать их экспериментально начал Галилей.

Еще в студенческие годы Галилей заметил, что хотя размах колебаний маятника с течением времени становится все меньше, но период их остается одинаковым. Это открытие было сделано им в соборе, где он наблюдал качание люстр, измеряя время биениями своего пульса.

Это постоянство периода колебаний навело Галилея на мысль применить маятник для измерения времени.

Галилей устроил для этой цели маленький маятниковый прибор, но колебания маятника быстро затухали. Поэтому его прибор был пригоден лишь для коротких про-



Тень, падающая от столбика (гномона) на коническую поверхность часов, показывает время.

межутков времени, например для определения врачами частоты биения пульса.

Между тем проблема измерения времени еще не была удовлетворительно разрешена в эпоху, когда жил Галилей.

Древние греческие ученые изобрели много разных солнечных часов. У одних тень столбика падала на вертикальную стену, у других — на поверхность шара, конуса или цилиндра. Эта тень, служившая стрелкой солнечных часов, по мере движения по небу солнца поворачивалась, указывая концом деления циферблата. Но эти часы годились только для измерения времени днем.

При астрономических наблюдениях пользовались водяными часами, усовершенствованием которых занимался еще Ктезибий в I веке до н. э. Этими часами время измерялось по количеству вытекавшей из сосуда воды.

Для градуирования водяных часов открывали кран верхнего сосуда в тот момент, когда восходящее солнце только касалось верхним краем горизонта. Когда же оно, передвинувшись на ширину диска, касалось горизонта

нижним краем, количество вытекшей воды определяло «шаг» солнца.

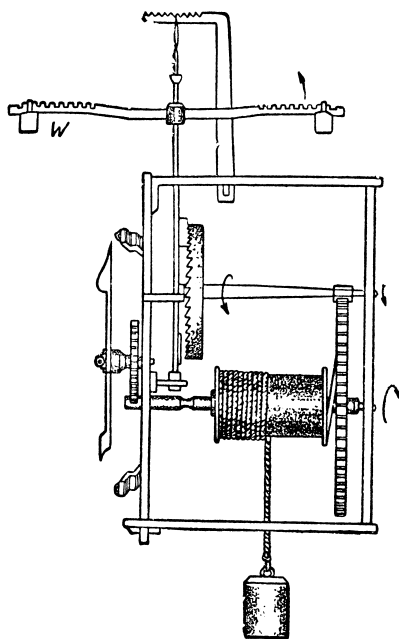
В XIV веке уже строились и колесные часы, приводившиеся в действие тяжестью гири. Так как опускание гири — ускоренное движение, то колесные часы нуждались в регуляторе. Они регулировались особым приспособлением, «биянцем», — горизонтальной штангой на вертикальной оси с насаженными на ней двумя лопатками. Храповое колесо часов при вращении упиралось зубцом то в верхнюю, то в нижнюю лопатку. Зацепив верхнюю лопатку, храповик двигал его в одну сторону. Через короткое время этот зубец терял соприкосновение с верхней лопаткой, но другой зубец зацеплял нижнюю лопатку и поворачивал ось «биянца» в обратную сторону.

Скорость хода зависела от инерции горизонтальной штанги. Чтобы замедлить его, «биянец» нагружали гирями, а иногда, в башенных часах, даже просто кирпичами.

Такие часы были установлены, например, в 1348 году на башне в Дувре (ими пользовались до 1872 года). Столетием позднее подобными же часами пользовались на обсерватории в Нюрнберге.

Открытие равномерности (изохронности) колебаний маятника навело на мысль конструкторов, что он может быть прекрасным регулятором колесных часов.

Галилей лишь в конце жизни пытался применить маятник в колесных часах. Он составил проект таких часов и поручил выполнение его своему сыну Винченцо. Но и Винченцо не успел закончить конструкцию часов. После смер-



Колесные часы, регулируемые колебаниями в горизонтальной плоскости рычага ψ — «биянца».

ти Галилея изобретенные им часы были проданы в 1649 году в числе других предметов оставшегося имущества.

Так погиб для науки этот замечательный памятник деятельности великого Галилея.

О наклонной плоскости

Инженеры, строители зданий, моряки часто пользовались наклонной плоскостью. Например, по наклонно положенным доскам перетаскивали грузы с пристани на борт судна. Но почему наклонная плоскость позволяет выиграть в силе, это стало известным лишь в XIII веке в связи с развитием городского строительства.

Голландский ученый Симон Стевин и Галилей почти одновременно дали вывод закона наклонной плоскости.

Стевин (1548—1620) был последователем статики Архимеда. Он не искал новых путей в механике твердого тела, а все-таки ему удалось разгадать закон наклонной плоскости, прибегнув к воображаемому опыту.

Стевин представил себе две наклонные плоскости разной длины с общей вершиной. Допустим, что на этих плоскостях лежит замкнутая цепь из шаров равного веса с одинаковыми промежутками между ними. Свободная же часть цепи висит под наклонными плоскостями.

На длинной наклонной плоскости лежит больше шаров, чем на короткой. Однако они не могут перетянуть шары, лежащие на короткой наклонной плоскости: если бы это случилось, то вся цепь пришла бы в движение, которое продолжалось бы вечно. Но, как известно, это невозможно.

Легко вывести, какова сила, увлекающая шары вдоль наклонных плоскостей в опыте Стевина. Число шаров на каждой из них пропорционально длине наклонной плоскости.

Значит, сила, действующая на шары (вдоль наклонных плоскостей), обратно пропорциональна их числу или длине плоскостей: если, например, одна плоскость в три раза длиннее другой, то на каждый шар, лежащий на длинной плоскости, действует в три раза меньшая сила, чем на шар, лежащий на короткой плоскости.

Этот закон будет верен, как бы мы ни меняли наклон плоскостей.

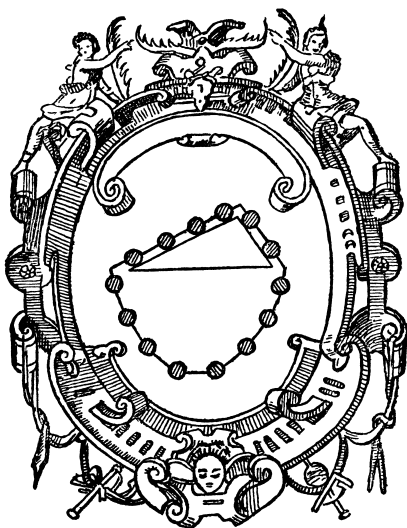
Теперь представим себе, что одна из плоскостей вертикальна, то есть служит высотой другой наклонной плоскости. Тогда сила, увлекающая шар вдоль наклонной плоскости, будет во столько раз меньше силы, увлекающей шар вдоль ее высоты (то-есть тяжести шара), во сколько высота наклонной плоскости меньше ее длины.

Это исследование было опубликовано Стевином в 1587 году на фламандском языке. Оно осталось неизвестным Галилею.

К исследованию свойств наклонной плоскости Галилей подошел иначе, чем Стевин. Галилею было известно «золотое правило» древних механиков — сколько выигрывается в силе, столько теряется в скорости. Например, поднимая груз на подвижном блоке, мы выигрываем в два раза в силе — скажем, 10 килограммов можно поднимать (если бы не было трения) силой в 5 килограммов. Но зато приходится сматывать веревку вдвое более длинную, чем высота, на которую поднимается груз.

Стевин первый отметил строгую пропорциональность между выигрышем в силе и потерей в скорости. Он указал, что возможное перемещение груза, подвешенного на подвижном блоке, вдвое меньше необходимого для этого перемещения уравновешивающей его силы.

Но Стевин не развил свою мысль, а Галилей доказал, что это правило справедливо для рычага и других простых машин. Оно представляет собой общий принцип, позднее развитый механиками и получивший название «начала возможных перемещений».



Шары, лежащие на длинной и на короткой наклонных плоскостях, уравновешиваются. Отсюда легко выводится закон наклонной плоскости.

Наклонная плоскость — также простая машина. При ее помощи можно малой силой катить вверх большой груз, и чем меньше наклон плоскости, тем меньшая нужна для этого сила.

Применив к наклонной плоскости «золотое правило», Галилей нашел отношение между грузом на ней и движущей его силой.

Положим, что груз, скользящий без трения по наклонной плоскости, уравновешен гирей, висящей на веревке, которая прикреплена к грузу и переброшена через блок на верху наклонной плоскости.

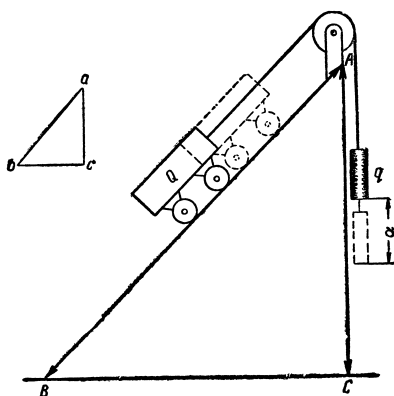
Во сколько раз гиря должна быть меньше груза, чтобы они уравновешивали друг друга? Это легко найти, представив себе, что гиря немного опустилась, а груз подвинулся по наклонной плоскости вдоль ее длины на такое же расстояние. Не трудно доказать, что по вертикали большой груз пройдет во столько раз меньшее расстояние по сравнению с малым, во сколько высота наклонной плоскости меньше ее длины.

Но по «золотому правилу» произведение большого груза

на расстояние, пройденное им по вертикали (а не вдоль наклонной плоскости), должно быть равно произведению малого груза на пройденное им расстояние.

Значит, малый груз во столько раз меньше большого, во сколько высота наклонной плоскости короче ее длины.

Так Галилей разрешил проблему наклонной плоскости, оставшуюся загадкой даже для гениального Архимеда. Он сумел обобщить найденный им закон наклонной плоскости, сделав знаменитый опыт с маятником.



Когда груз q опустится на величину a , груз пройдет такое же расстояние вдоль наклонной плоскости. Но по вертикали он продвинется на расстояние меньшее в отношении

$$\frac{ac}{ab} = \frac{AC}{AB}.$$

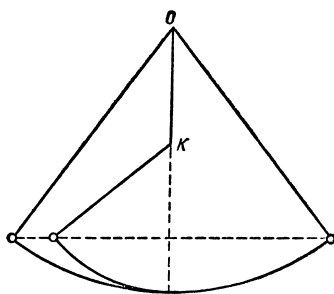
Подвесив небольшой тяжелый шарик на тонкой нити, Галилей отводил его в сторону и отпускал. Шарик начинал колебаться, то опускаясь, то поднимаясь по дуге круга.

Подъем шарика при колебании происходил (если не принимать во внимание сопротивления воздуха и трения в точке подвеса) до той же высоты, с какой он начинал свое движение.

Галилей вбил гвоздь прямо под точкой подвеса маятника, так что при колебании его нить огибала гвоздь. Когда колеблющийся шарик, описав половину прежней длинной дуги, задевал нитью за гвоздь, его движение дальше продолжалось по дуге меньшего радиуса. Но все-таки он, как и ранее, достигал той же высоты.

Галилей отводил шарик в другую сторону, чтобы колебание его начиналось, когда нить обогнула гвоздь. Отпущенный шарик, пройдя по дуге меньшего радиуса, все-таки приобретал в нижней точке ту же скорость, которая позволяла ему подняться до той же высоты по большой дуге.

Опыт Галилея доказывал, что скорость, приобретаемая падающим телом, зависит только от разности высот, а не от длины пройденного пути.



Маятник, подвешенный в точке O , поднимается на ту же высоту, если он огибает гвоздь K .

Инерция движения

Некоторое представление об инерции тел было известно с древнейших времен. Всегда люди знали, что предметы не начинают двигаться сами по себе, без действия на них силы: тяжести перевозились лошадьми, пыль переносилась ветром, мельницы приводились в движение водой.

Из таких наблюдений и вытекали воззрения древних ученых на движение тел. Например, Аристотель не имел никакого понятия об инерции движения. Он был уверен, что тело движется только под действием силы и немед-

ленно останавливается, как только прекращается ее действие.

Леонардо да Винчи и Бенедетти еще смутно представляли себе инерцию движения. Только Галилей вполне ясно осознал это явление. Он ввел в механику и самый термин «инерция», впервые упомянутый Кеплером.

В ранних работах по механике Галилей еще не сформулировал принципа инерции. Но он, что совершенно очевидно, пользовался им в своих исследованиях.

Однако современники его, усваивавшие в университетах динамику Аристотеля, не были подготовлены к восприятию этого нового понятия в механике. Поэтому Галилею пришлось выдержать упорную борьбу со схоластиками.

В своих умозрительных положениях аристотелианцы часто ссылались на опыты, но... они не делали их.

Так было и с вопросом об инерции.

Схоласты утверждали, будто камень, сброшенный вниз с мачты движущегося корабля, отстанет от мачты. Между тем стоило только сделать этот опыт, чтобы убедиться в ошибочности их мнения.

Галилей же указывал на сделанные в действительности наблюдения, что «камень, падающий с корабельной мачты, всегда попадет в одно и то же место, движется ли корабль или стоит на месте».

Незнание инерции ставило в большое затруднение схоластов, когда нужно было объяснять явление движения.

Почему летит камень, брошенный рукой?

Почему продолжает плыть лодка, когда уже подняты весла?

Аристотелю постоянно приходилось придумывать объяснения, которые если и могли быть приняты, то только для данного случая. Схоласты даже и не стремились сами объяснять явление природы. Им достаточно было знать, что говорил об этом Аристотель.

Но Галилей искал законы движения тел. Он открыл инерцию, объясняющую и полет брошенного камня и движение лодки, когда подняты весла.

Свойство инерции тел установлено наблюдением. Равномерное движение сохраняется тем дольше, чем меньше препятствий оно встречает на своем пути: брошенный шар катится по садовой дорожке значительно дальше, чем по

траве; еще дальше он покатится по доскам и тем более по гладкому льду, потому что на садовой дорожке трение меньше, чем на траве, на досках — меньше, чем на дорожке, и еще меньше трение на льду.

Из подобных наблюдений Галилей сделал вывод, что равномерное прямолинейное движение — такое же естественное состояние тела, как и покой.

Доказать теоретически существование инерции тел нельзя: это — свойство физических тел, и оно может быть познано только путем наблюдения и опыта.

К такому воображаемому опыту (предполагая, что нет трения) и прибегал Галилей, чтобы убедить своих современников в существовании инерции.

В своем сочинении «Диалог о двух системах мира» он писал:

«На наклонной плоскости тяжелое тело движется вниз ускоренным движением, и чтобы его удержать в покое, требуется употребить силу; на восходящей плоскости сила, напротив того, требуется, чтобы гнать его вверх, а также, чтобы его там удержать... Теперь скажите, что будет с тем же телом на плоскости, которая ни вниз не опускается, ни вверх не поднимается!» Ответ таков: «Если длина ее будет бесконечна, то и движение будет без границ, то-есть вечно».

Обращаясь, по существу говоря, к опыту, Галилей придал своему доказательству форму логического рассуждения, привычную ученым его времени.

Позднее, в своих «Беседах и математических доказательствах о двух новых науках», Галилей повторил это утверждение в более ясной и категорической форме:

«Когда тело движется по горизонтальной плоскости, не встречая никакого сопротивления движению, то... движение его является равномерным и продолжалось бы бесконечно, если бы плоскость простиралась в пространстве без конца».

Вводя понятие об инерции движения, Галилей решительно порывал с динамикой Аристотеля, подрывая самые основы натурфилософской механики.

Вместе с тем инерция позволила Галилею правильно понять, как движется тело под действием на него постоянной силы.

Первой проблемой, которой занялся Галилей, было свободное падение тел.

Законы свободного падения

Свободное падение издавна привлекало наибольшее внимание механиков и мыслителей. В средние века оно занимало умы уже не только ученых. О нем велись оживленные беседы при дворах итальянских герцогов, в «академиях», в мастерских художников и ремесленников. Всех удивляло, почему свинцовый шар при падении не обгоняет деревянный, хотя первый гораздо тяжелее второго.

Но как ни убедительно было свидетельство опыта, схоласти продолжали верить Аристотелю, будто бы чем тяжелее тело, тем быстрее оно падает.

Даже в 30-х годах XVII века вопрос о свободном падении не потерял своей остроты; это доказывает обмен мнениями собеседников в «Диалоге» Галилея:

С а л в и а т и. ...ядро в фунт, десять, сто и тысячу фунтов проходит те же сто локтей¹ в одно и то же время.

С и м п л и ч и о. О, этому я не верю, как не верил и Аристотель, который пишет, что скорости падающих тел находятся... в таком же отношении, как их веса.

С а л в и а т и. Если вы, синьор Симпличио, хотите принять это за истину, то вам придется поверить, что если дать падать в один и тот же момент с высоты ста локтей двум ядрам из одного и того же материала, одному — в сто фунтов, а другому — в один, то большее дойдет до земли, в то время как меньшее опустится едва ли на один локоть; теперь постарайтесь, если только сможете, представить себе в воображении большое ядро уже лежащим на земле, а меньшее — находящимся на локоть от вершины башни».

Словами Сальвиати говорит сам Галилей, указывающий на явное противоречие мнения Аристотеля действительно наблюдаемому свободному падению.

Еще в Пизе Галилей не раз поднимался на наклонную башню для опытов, приглашая присутствовать при них и своих противников. Он сбрасывал с башни ядра разного веса, показывая, что они одновременно падают на землю.

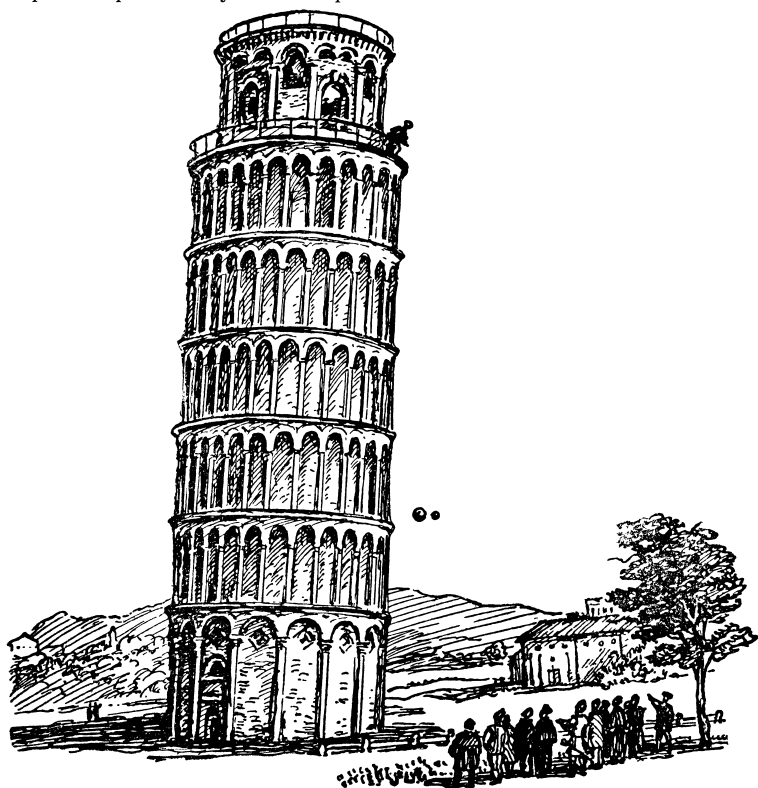
Но, несмотря на очевидность заблуждения Аристотеля, схоласти отрицали значение опытов Галилея. Они указы-

¹ Локоть — древняя мера длины, равная приблизительно длине локтевой кости. Длина локтя колебалась от 370 до 555 миллиметров.

вали на ничтожное отставание менее тяжелых ядер. Между тем оно легко объяснялось влиянием сопротивления воздуха, больше действовавшего на менее тяжелые тела.

Чтобы бить своих врагов их же собственным оружием, Галилей прибегал к чисто логическим доказательствам в духе того времени. Он указывал, например, что «если одна лошадь может пробегать в час 3 мили и другая столько же, то они не пробегут 6 миль в час, если их запрячь вместе».

Конечно, это — только остроумное сравнение, а не доказательство. Более серьезное значение, как казалось, могло иметь следующее указание Галилея на внутреннее противоречие в учении Аристотеля о падении тел: если бо-



Опыт Галилея со сбрасыванием тяжелых и легких ядер с наклонной башни.

лее тяжелое тело падает быстрее, чем легкое, то какова скорость падения связанных вместе этих тел? Тяжелое должно ускорять, а легкое замедлять падение связанного с ним тела. Значит, скорость должна быть некоторой средней. По учению же Аристотеля, она должна быть большей, чем у тяжелого тела.

Понятно, что подобное рассуждение не могло решить проблему свободного падения. В нем Галилей обращается к еще более сложной проблеме — взаимодействию тел, законы которого отнюдь не очевидны.

Галилей и не довольствовался такими рассуждениями. Он правильно думал, что только опыт может подвести к открытию законов движения тел. И Галилей прибегнул к опыту с маятником — колеблющимся тяжелым шариком на тонкой нити.

Колебание маятника происходит потому, что отведенный в сторону грузик падает. Но нить удерживает его на одном и том же расстоянии от точки подвеса. Поэтому грузик движется по дуге круга.

Достигнув низшей точки, грузик по инерции поднимается до прежней высоты и останавливается. Затем он снова падает и так колеблется из стороны в сторону, пока его не остановит сопротивление воздуха.

Галилей пробовал подвешивать на нити свинцовую пулю, пробку, глиняный шарик. Все эти маятники при равной длине совершали колебания в одинаковый промежуток времени. Значит, скорость падения грузиков не зависела от их веса. Но по каким законам движется свободно падающее тело? Это еще никому не было известно. Только Галилей, положивший в основу своих исследований инерцию движения, сумел вывести эти законы.

Прежде чем приступить к решению проблемы движения тел, Галилей должен был внести ясность в понятия о скорости и ускорении.

Что такое скорость равномерно движущегося тела, это было известно всем. Но что понимать под скоростью тела, ускоряющего или замедляющего свое движение?

Галилей ввел понятие о средней скорости.

Положим, что, двигаясь ускоренно, тело прошло в течение некоторого времени определенное расстояние. Можно представить, что за то же время оно могло пройти такое расстояние, двигаясь равномерно. Скорость, которую оно должно иметь в этом случае, и есть средняя скорость.

Это понятие было новым во времена Галилея. Еще менее ясным казалось тогда представление об ускорении и вызывающей его причине.

Что свободное падение есть равномерно ускоренное движение, было замечено еще древними философами. В средние века Леонардо да Винчи также отметил ускоренный характер свободного падения. Он даже высказал мнение, что скорость свободно падающего тела возрастает в арифметической прогрессии, но не сделал из этой гипотезы выводов.

Галилей первый объяснил причину ускорения свободно падающего тела. Он понял, что сила тяжести в каждое мгновение сообщает телу движение, сохраняющееся по инерции. Значит, под влиянием силы тяжести скорость свободного падения должна непрерывно увеличиваться.

Изучая движение падающих тел, Галилей предположил, что ускорение постоянно, то-есть увеличение скорости одинаково за каждую секунду.

«Приращение скорости мы проще всего можем представить себе, — писал он, — как происходящее в соответствии с такими же равными промежутками времени. Умом своим мы можем признать такое движение единообразным и неизменно равномерно ускоряющимся».

Сделав такое предположение, Галилей мог уже теоретически вывести законы свободного падения тел.

Из постоянства ускорения следовало, что под действием силы тяжести скорость падающего тела возрастает пропорционально времени. А вычислив среднюю скорость, легко найти и пройденное телом расстояние.

Сделав эти выводы, Галилей писал в «Диалоге»: «Вы должны уже знать, что тяжелое тело, падая и приобретая все новую скорость... обладает в любом месте на линии своего движения такой степенью скорости, что если бы оно продолжало двигаться далее равномерно, не увеличивая более скорости, то за промежуток времени, равный тому, какой оно потратило на падение, оно прошло бы пространство, вдвое большее против пройденного»¹.

¹ Расстояние, пройденное телом на промежуток времени t , равно $\frac{gt^2}{2}$, а скорость его в конце падения $v = gt$. Если бы тело стало двигаться далее равномерно, то за то же время t оно прошло бы расстояние gt^2 , то-есть вдвое больше, чем за предыдущий промежуток времени.

Галилей вывел законы свободного падения, предположив, что это — равномерно ускоренное движение.

Но таково ли оно в действительности?

Подтвердить предположение Галилея и справедливость его законов мог только опыт.

Проверка опытом законов падения

Как же можно было проверить законы Галилея на опыте? Нельзя же заметить, какое расстояние пролетает свободно падающее тело в первую, вторую, третью и так далее секунду. С большим трудом, и не очень точно, можно было, пожалуй, лишь установить время, в течение которого падающее тело проходит расстояние от вершины башни до земли.

Галилей избрал, однако, другой путь для проверки теоретически найденных им законов. Он прибег к помощи наклонной плоскости.

Шарик скатывается по наклонной плоскости под действием силы тяжести. Значит, свободное скатывание шарика по наклонной плоскости должно происходить по тем же законам, как и свободное падение. Скорость же скатывания можно сколько угодно уменьшить, изменяя угол наклона плоскости.

Пуская шарик по наклонной плоскости, можно было измерить время, необходимое шарiku, чтобы скатиться до ее основания. Длина наклонной плоскости известна. Значит, можно было вычислить, каково ускорение скатывания по наклонной плоскости.

Для опытов Галилей взял доску длиной двенадцать локтей, конец которой был приподнят только на один-два локтя. Посередине доски был простроган узкий жолоб, выстланный очень гладким пергаментом для уменьшения трения. По жолобу скатывались бронзовые шарики, пускавшиеся Галилеем. Время измерялось водяными часами, то-есть по количеству воды, успевавшей вытечь из верхнего сосуда в нижний.

Сперва шарик был пущен с верхнего конца жолоба. Когда он докатился вниз, Галилей заметил по водяным часам, сколько понадобилось ему на это времени.

По закону, выведенному теоретически Галилеем, расстояние, пройденное свободно падающим телом, увеличи-



Опыт Галилея со скатыванием шариков по наклонной плоскости.

вается пропорционально квадрату времени. Следовательно, в четыре раза более короткий путь шарик должен пройти во вдвое более короткий промежуток времени. Пустив шарик с верхнего конца четвертой части длины жолоба, Галилей убедился, что для этого расстояния шарiku действительно понадобилось только вдвое меньше времени.

Так было доказано, что скатывание по наклонной плоскости подчиняется закону, выведенному для свободного падения. Значит, предположение Галилея, что ускорение свободного падения постоянно, справедливо.

Пользуясь наклонной плоскостью, можно было определить ускорение скатывания по ней. Для этого достаточно только заметить время, в течение которого шарик проходит всю ее длину.

Галилей хотел из этого опыта определить ускорение свободного падения. Он не знал, что вращение шарика очень усложняет эту задачу, которая могла быть реше-

на таким путем только после открытия законов вращения тел.

Вот если бы можно было осуществить опыт скольжения тела без трения по наклонной плоскости, то такая задача не представила бы затруднений.

Допустим, что тело, скользящее по наклонной плоскости, прошло длину ее l за t секунд. Тогда $l = \frac{at^2}{2}$, где a — ускорение скольжения.

Из закона наклонной плоскости следует, что сила, действующая вдоль нее, во столько раз меньше силы тяжести, во сколько высота ее меньше длины. Поэтому ускорение свободного падения легко было бы определить, зная ускорение скользящего тела.

Галилей изучал движение падающего тела кинематически, то-есть только с геометрической стороны. Он не принимал во внимание силы тяжести, сообщающей телам движение. Самое понятие о силе еще было неясным. Галилей часто называл причину, вызывающую движение, «импульсом» — слово, обозначающее в современной механике произведение силы на время (равное количеству движения). Но открытие кинематических законов движения падающих тел все-таки позволило Галилею решать практические задачи техники, например баллистики — науки о движении пушечных ядер.

Проблема траектории брошенного тела

Открытие законов свободного падения было началом динамики. Оно позволило немедленно же разрешить давнишнюю проблему о траектории пушечного ядра, которая имела важный практический характер.

Ядро вылетает из пушки под огромным давлением расширяющихся горячих газов. По выходе из ствола оно двигалось бы по инерции равномерно и прямолинейно, если бы его не притягивала Земля. Но как только оно покинет ствол пушки, притяжение Земли заставляет его падать.

Траектория брошенного тела определяется сложением поступательного движения и свободного падения.

Понятие о независимости движений было известно еще Аристотелю, указавшему правило их сложения: совершая движение в двух различных направлениях, тело движет-

ся по диагонали параллелограмма, построенного на скоростях этих движений.

Но почему ни Аристотель, ни его последователи не решились проблему траектории брошенного тела? Этому помешало их пренебрежение опытом: сложение движений они рассматривали только как геометрическую теорему. Но они не наблюдали движений физических тел и не знали, что реальные движения в действительности именно так и складываются. Только поэтому аристотелианцы и могли утверждать, будто бы ядро сперва летит прямолинейно в направлении выстрела, а затем падает вертикально. Ошибочность этого мнения легко было доказать, бросив камень и наблюдая его движение.

Галилей же применил кинематическое правило сложения движений к действительному движению физических тел. Так, например, описывая воображаемый опыт с шаром, который катится по горизонтальной плоскости, он говорил: «...если же плоскость конечна и расположена высоко, то тело, имеющее вес, достигнув конца плоскости, продолжает двигаться далее таким образом, что к его первоначальному, равномерному, беспрепятственному движению присоединяется другое, вызываемое силой тяжести, благодаря чему возникает сложное движение, складывающееся из равномерного горизонтального и естественно ускоренного движения».

Исходя из свойства инерции движущихся тел, Галилей утверждал, что выброшенное пушкой ядро совершает одновременно два движения: по инерции равномерное, прямолинейное и под действием тяжести равномерно-ускоренное. Он указывал, что скорость падения не зависит от поступательного движения ядра вперед.

Эта мысль была совершенно нова и неожиданна для механиков начала XVII века. На пояснении ее особенно внимательно и остановился Галилей: «Не замечательная ли вещь, — говорит один из собеседников в «Диалоге», — что в то самое малое время, какое требуется для вертикального падения на землю с высоты каких-нибудь ста локтей, ядро, силою пороха выброшенное из пушки, пройдет четыреста, тысячу, четыре тысячи, десять тысяч локтей, — так что при всех горизонтально направленных выстрелах останется в воздухе одинаковое время».

Можно считать, что в каждый очень короткий промежуток времени ядро движется по диагонали прямоуголь-

ника, построенного на скоростях равномерного движения по горизонтали и ускоренного движения по вертикали.

Разобьем все время, прошедшее от момента вылета ядра из пушки до падения его на землю, на большое число очень коротких равных промежутков.

В течение каждого такого промежутка времени ядро проходит по горизонтали одно и то же расстояние. По вертикали же пройденные расстояния возрастают, как натуральный ряд нечетных чисел.

В каждый промежуток времени ядро движется по диагонали прямоугольников, построенных на скоростях движения по горизонтали и по вертикали.

Если промежутки времени очень малы, то диагонали совпадают с плавной кривой линией, загигающей вниз, к земле. Не ограничиваясь этим выводом, Галилей доказал, что траектория ядра — парабола.

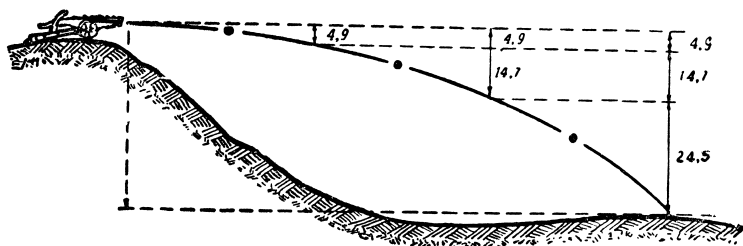
После этого не осталось сомнений, что нельзя направлять ствол орудия прямо на цель. Для попадания в далекий предмет нужно стрелять наклонно вверх. Для разных расстояний этот угол различен.

Нетрудно построить и траекторию ядра, откладывая по направлению его движения скорость, а по вертикали — пройденные расстояния в свободном падении в первую, вторую, третью и так далее секунды. Она будет всегда параболой с ветвями различной длины. Только при выстреле под углом в 45° к горизонту, если бы не было сопротивления воздуха, ядро описало бы равнобочную параболу. В этом случае оно пролетело бы и наибольшее расстояние.

Исследовав траекторию ядра, Галилей решил одну из важнейших проблем баллистики. После этого можно было составить таблицы для точной наводки орудий.

Галилей понимал, конечно, что выведенные им законы динамики вполне справедливы, только когда движущееся тело не встречает препятствий на своем пути. Но свободно падающие или брошенные тела движутся в воздухе, сопротивляющемся движущимся в нем телам. Поэтому свободное падение в атмосфере не может быть строго равномерно-ускоренным: по мере возрастания скорости очень быстро увеличивается и сопротивление воздуха. Ускорение постепенно уменьшается, и, достигнув определенной скорости, свободно падающее тело движется равномерно.

Сопротивление воздуха меняет и результаты расчета траектории тела, брошенного под углом к горизонту. Ядро



Выброшенное из орудия ядро, двигаясь вперед, одновременно падает. Сложение этих движений определяет траекторию ядра (размеры даны в метрах).

постепенно замедляет прямолинейное движение по инерции. Поэтому нисходящая ветвь траектории в действительности круче, чем должна быть по расчету, и траектория брошенного тела несколько отличается от параболы.

Однако эти отступления не умаляют значения законов динамики, открытых Галилеем. Эти законы служат основой для расчетов свободного движения тел. Только в расчеты должны быть внесены поправки на сопротивление среды, которое определяется путем опытов.

Гидростатика в XVI—XVII веках

До XVI века ученые и инженеры при определении условий равновесия жидкости пользовались только работами Архимеда. Дальнейшее развитие гидростатика получила в трудах упоминавшегося ранее современника Галилея — Симона Стевина.

Проведя свою молодость в далеких плаваниях, Стевин близко познакомился с вопросом об устойчивости судна. Позднее он был инспектором водных сооружений Голландии, имевших огромное значение для существования этой маленькой страны. Ему пришлось столкнуться с определением давления на ворота шлюзов и тому подобными задачами.

Эта практическая деятельность определила направление научных исследований Стевина. Большую часть времени и трудов он посвятил проблемам гидростатики. Свои гидростатические исследования Стевин изложил в упомянутом уже большом труде «Начала статики», изданном на фламандском языке в 1587 году.

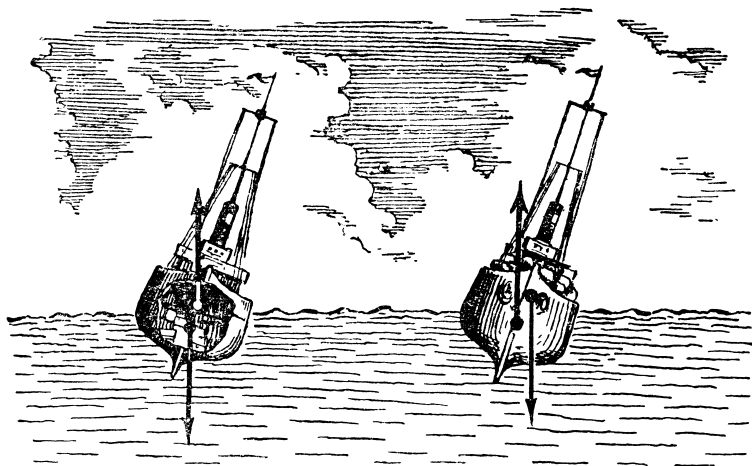
Подобно Архимеду, Стевин при построении своих теорий исходил из немногих очевидных положений, но теоретические выводы подвергал проверке опытом. Он был не эмпириком, а экспериментатором в современном значении этого слова.

В основу своих исследований Стевин положил представление, что равновесие частицы жидкости обусловлено давлением окружающих ее частиц; так как каждая частица жидкости находится под действием силы тяжести, то отсюда следует, что она поддерживается в равновесии давлением снизу вверх, равным ее весу. Значит, погруженное в жидкость твердое тело испытывает давление снизу вверх, равное весу вытесненной им жидкости.

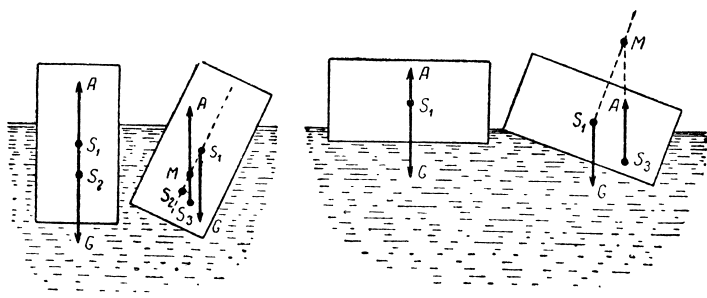
Так выводил Стевин известный закон Архимеда.

Далее Стевин разобрал все возможные случаи равновесия плавающих тел и применил их к определению устойчивости судов.

Плавающее тело находится под действием двух сил. Одна из них — собственная тяжесть, влекущая тело вниз и приложенная к его центру массы. Другая — выталкивающая тело из жидкости вверх. Она равна весу вытес-



Судно с тяжелым грузом в трюме (слева) устойчиво, потому что у него центр тяжести находится ниже центра давления. Если же перегрузить палубу до того, что центр тяжести станет выше центра давления, то судно (справа) может опрокинуться.



Случай, когда центр тяжести выше центра давления. S_1 — центр тяжести; S_2 — центр давления при состоянии равновесия; S_3 — центр давления, когда тело наклонено; M — метациентр; G — сила тяжести; A — сила давления.

ненной телом жидкости и приложена к центру давления, совпадающему с центром тяжести вытесненной жидкости.

По величине эти силы равны, а по направлению — диаметрально противоположны. В зависимости от относительного положения центра тяжести тела и центра давления, тело может находиться в устойчивом, неустойчивом или безразличном равновесии. Относительное же положение этих точек зависит от формы плавающего тела и степени его погружения в жидкость.

Положим, что трюм судна нагружен камнем или металлом. При большой нагрузке центр тяжести всего судна опустится ниже центра давления. Как бы ни было наклонено судно ветром, оно будет снова выпрямляться. Это — случай устойчивого равновесия.

Если же центр тяжести судна, например при большой нагрузке его палубы, переместится выше центра давления, то судно может опрокинуться. Это — случай неустойчивого равновесия.

Отметим, что и в этом случае плавающее тело может иногда сохранить устойчивое равновесие.

Допустим, что тело, центр тяжести которого лежит выше центра давления, наклонилось. Тогда центр давления переместится вправо или влево от линии, проведенной через центр тяжести и центр давления в состоянии равновесия.

Теперь на тело действует вращающая пара: сила тяжести G и сила давления A . Если направление давления,

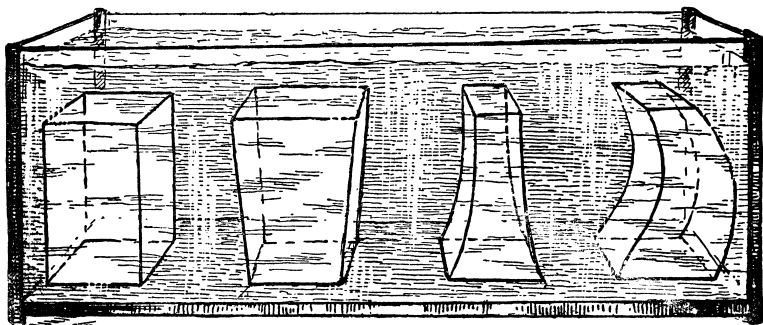
приложенного к новому его центру, пересекает указанную линию выше центра тяжести (эта точка M пересечения носит название метацентра), то равновесие восстанавливается. Когда же метацентр ниже центра тяжести — плавающее тело опрокидывается.

Занимаясь исследованием давления внутри жидкости, Стевин прибегал к мысленным опытам. Он представлял себе, например, что некоторая часть находящейся в равновесии жидкости отвердела. Это не меняет условий равновесия части, оставшейся в жидком виде.

Стевин первый пришел к мысли, что давление жидкости на дно сосуда зависит только от площади дна и высоты уровня жидкости.

Выделим мысленно в жидкости, находящейся в равновесии, несколько столбов разнообразной формы, опирающихся на одинаковые по размерам площадки, лежащие на одной и той же глубине. Эти площадки находятся под одинаковым давлением, так как в противном случае жидкость пришла бы в движение.

Теперь представим себе, что вся жидкость вне выделенных мысленно столбов затвердела. Оставшаяся жидкость столбов давит на основание их с той же силой, как и ранее. Следовательно, давление на дно образовав-



Воображаемый опыт Стевина. Выделим мысленно в жидкости ее части, опирающиеся на пластинки одинаковой площади. Если бы поверхности, отделяющие воду над этими пластинками, затвердели, то образовались бы сосуды разной формы с одинаковым дном. Давление воды на дно этих сосудов осталось бы прежним и во всех сосудах было бы одинаково, даже если бы вода вне сосудов затвердела. Отсюда следует, что давление на дно сосуда зависит только от площади дна и высоты столба жидкости.

шихся сосудов, несмотря на их разнообразную форму, будет одинаковым.

Свое открытие Стевин проверял и подкреплял опытами, в которых дно разнообразных по форме сосудов служило чашкой весов. Оказалось, что действительно давление жидкости на дно сосуда зависит только от площади дна и высоты ее уровня.

Это открытие позволило объяснить некоторые удивительные факты, известные ученым того времени, как, например, такой замечательный опыт.

Плотный кожаный мешок наполнялся водой через вделанную в него короткую металлическую трубку с краном. Затем на конец этой трубки навинчивалась другая — стеклянная, колено которой длиной 150—175 сантиметров поддерживалось в вертикальном положении.

На мешок клали деревянную дощечку, на которую становился человек. Тогда открывали кран, и тяжесть человека выдавливала воду в вертикальную трубку. Но, к удивлению присутствовавших при этом опыте, вода поднималась не выше 75—100 сантиметров.

В чем же дело? Простой расчет легко объясняет это.

Пусть человек весит 75 килограммов, а дощечка размерами 25×40 сантиметров вся соприкасается с поверхностью кожаного мешка. Тогда на каждый квадратный сантиметр площади соприкосновения давит $\frac{75\,000}{1000} = 75$ граммов.

Давление человека уравнивается, если вода в трубке поднимется на 75 сантиметров. В самом деле: вес столба воды в трубке с поперечным сечением один квадратный сантиметр равен 75 граммам; это давление передается в мешке с водой во все стороны и увеличивается пропорционально поверхности. Поэтому на дощечку будет давить снизу $75 \times 1000 = 75\,000$ граммов, уравнивая человека.

Это явление получило название «гидростатического парадокса». Обычно его связывают с именем французского физика Паскаля, независимо от Стевина открывшего это явление.

Подобным же способом Стевин доказывал закон равновесия жидкости в сообщающихся сосудах. Он выделял мысленно в жидкости произвольной формы изогнутый канал, концы которого выходят на поверхность. Если бы

вся жидкость вне воображаемого канала затвердела, условия равновесия оставшейся жидкости в канале не изменились бы, то-есть она стояла бы в образовавшихся сообщающихся сосудах на одной высоте.

Свои теоретические выводы Стевин прилагал к решению возникавших у него технических задач. Он определил, например, давление воды на вертикальные ворота закрытого шлюза. Оно равно весу столба воды, основание которого равно площади ворот, а высота — половине глубины канала.

Независимо от Стевина Галилей также проверил закон Архимеда и вывел условия равновесия плавающих тел. Он доказывал ошибочность взглядов последователей Аристотеля, которые утверждали, будто плавание тела зависит главным образом от его формы.

В доказательство этого приводился такой пример: если тонкую металлическую пластинку осторожно опускать на ладони, погружаемой в сосуд с водой, то она может остаться на поверхности воды. Но, как известно, это явление происходит вследствие поверхностного натяжения. Тончайший слой на поверхности жидкости ведет себя как упругая пленка. Он заставляет, например, небольшое количество жидкости сохранять шарообразную форму капли.

Металлическая пластинка или игла, побывав в руках, покрывается незаметным тончайшим слоем жира. Поэтому она не смачивается водой и ее поддерживает пленка поверхностного натяжения воды. Если же пластинку или иглу, а также руки вымыть в спирте, то опыт с плаванием этих предметов не удастся, так как игла будет смачиваться водой и целость пленки поверхностного натяжения нарушится.

В XVII веке не было еще известно объяснение этого явления. Однако Галилей для опровержения мнения аристотелианцев произвел другой опыт, доказывая, что плавающее тело поддерживается давлением жидкости.

Опыт Галилея заключался в том, что погруженный в воду восковой шар тонет; когда же в ней начинают понемногу растворять соль, то шар всплывает, хотя форма его не изменилась.

Галилей правильно указал, что всплывание шара зависит от увеличения плотности соляного раствора.

До исследований Галилея все были уверены, что тело

плавает лишь в том случае, если вытесняет объем воды, вес которого превышает тяжесть тела. Утверждая, что главную роль играет удельный вес тела, Галилей указывает на следующий опыт.

Поместим плавающее тело цилиндрической формы в наполненный водой широкий сосуд и заметим, насколько оно возвышается над уровнем воды. Затем поместим это тело в цилиндрический сосуд, между стенками которого и телом остается только очень узкая щель, и нальем в него воды. Вода должна покрыть помещенное в нем тело до той же высоты, как было в широком сосуде. Тогда тело в узком сосуде также будет плавать, возвышаясь настолько же над уровнем окружающей его воды, хотя вес вытесненной воды меньше веса тела.

Эти выводы были большой неожиданностью для современников Галилея: они еще держались мнения, будто корабль лучше поддерживается водой в большом бассейне, чем в малом. Галилей же со свойственной ему иронией замечает, что «корабль так же хорошо плавает в 10 бочках воды, как в океане».

Галилей объяснил и равенство уровней жидкости в двух сообщающихся сосудах разного диаметра, сравнивая равновесие жидкости в этом случае с рычагом, на котором большой груз уравнивается малым.

Последователи Галилея, продолжая его работы, заложили начало динамики жидких тел.

Возникновение гидродинамики

Гидромеханические исследования Галилея продолжил итальянский физик и математик Эванджелиста Торричелли (1608—1647).

Познакомившись с «Беседами о двух новых науках» Галилея, Торричелли увлекся вопросами механики и написал сочинение «Трактат о движении под действием тяжести». В этом труде он развивал идеи Галилея, стремясь дать его законам динамики новые доказательства.

Узнав об этой работе молодого ученого, Галилей пригласил его к себе. Торричелли приехал в 1641 году к Галилею в его домик в Арчетри, где и остался до кончины великого механика.

После смерти Галилея тосканский герцог предложил

Торричелли должность придворного математика, сохранявшуюся за Галилеем, несмотря на осуждение его инквизиторами.

Торричелли остался во Флоренции и занялся продолжением работ, начатых его учителем.

В то время законы движения воды приобрели особый интерес для техников. По количеству вытекающей из сосуда воды измерялось время. В садах аристократов и богатых купцов устраивались фонтаны. В городах строились водопроводы. Для орошения полей проводились каналы.

Из многочисленных проблем, возникавших у техников того времени, Торричелли выбрал для разрешения вопрос об истечении воды из отверстия в сосуде, имевший первостепенное значение при построении водяных часов.

Торричелли установил такой закон: скорость жидкости, вытекающей из сосуда, имеет ту величину, какую приобрело бы тело при падении с высоты, равной высоте уровня жидкости над отверстием (независимо от направления струи).

Но скорость падения изменяется обратно пропорционально квадратному корню из высоты¹. Значит, скорость истечения и количество вытекающей воды за единицу времени также изменяются обратно пропорционально корню квадратному из высоты уровня жидкости над отверстием.

Из этого закона можно было вывести ряд следствий. Например, водяная струя, бьющая из отверстия в стенке сосуда, должна иметь форму параболы, ветвь которой все более приближается к стенке сосуда, по мере того как понижается уровень жидкости над отверстием.

Из короткой с загнутым вверх концом трубки вода должна выбрасываться вверх до той же высоты (без учета сопротивления воздуха и т. п.), на какой стоит вода в сосуде, с которым соединена трубка.

Исследования Торричелли имели большое значение при решении практических вопросов гидравлики.

¹ Если тело падает с высоты h , то в конце времени t его скорость равна $v = gt$, а пройденное расстояние $h = \frac{gt^2}{2}$; определив

из последней формулы $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ и подставив в формулу скорости,

найдем $v = \sqrt{2gh}$.

С именем Торричелли связано не только заложение основ гидравлики, но и открытие давления атмосферы, о чем будет сказано дальше.

К несчастью для науки, Торричелли умер очень рано, в возрасте тридцати девяти лет. Не дольше прожил и его знаменитый современник, также занимавшийся исследованиями движения жидкостей и газов, — французский ученый Блез Паскаль (1623—1662).

Отец Паскаля, сам интересовавшийся математикой, не хотел слишком рано знакомить с ней своего сына, чтобы не отвлечь его от изучения языков. Но мальчик настойчиво упрашивал отца сказать, что такое геометрия.

Когда он узнал, что геометрия есть «искусство правильно чертить фигуры и искать соотношения между ними», то стал сам выводить геометрические теоремы. Тогда его отец разрешил будущему знаменитому ученому заниматься изучением математики.

Паскаль так быстро овладел известными в то время геометрическими знаниями, что в возрасте шестнадцати лет уже написал работу о конических сечениях, не потерявшую своего значения даже и в наши дни. Позднее он опубликовал еще несколько математических работ и изобрел счетную машину.

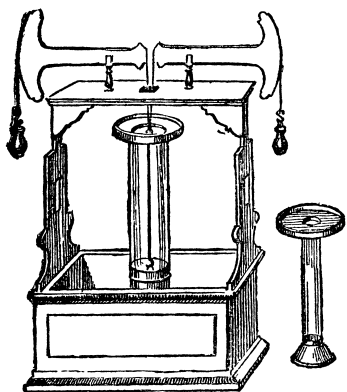
Научные интересы Паскаля не ограничились математикой. С 1647 года он начал заниматься и физическими исследованиями.

Независимо от Стевина, Паскаль открыл гидростатический парадокс. Он построил прибор для демонстрации этого явления, так называемый «сосуд Паскаля». Вследствие этого первое открытие гидростатического парадокса связывается обычно с его именем, хотя впервые на него указал Стевин.

В своих гидромеханических изысканиях Паскаль шел



Опыт Торричелли с бочкой. Вода бьет из трубки струей, почти достигающей уровня воды в бочке.



Сосуд Паскаля. Давление на концы рычагов, передаваемое тягой от дна сосуда, зависит только от площади дна и высоты столба воды.

по следам Галилея, широко применяя принцип возможных перемещений. Но он глубже исследовал вопрос о передаче давления в жидкости, изложив свои выводы в трактате «О равновесии жидкостей».

Паскаль проводил аналогию между передачей давления в жидкости и действием простых машин. Он утверждал, что «сосуд, наполненный водой, является новым принципом механики и новой машиной для увеличения сил в желаемой степени, потому что при помощи этого средства человек может поднять любую предложенную ему тяжесть».

Правда, гидравлический пресс, основанный на законе передачи давления в жидкости, был изобретен еще Галилеем в 1594 году. Тогда же Галилей и получил патент на это изобретение от венецианского дожа (наименование правителей Венеции).

Но гидравлический пресс получил широкое практическое применение только через двести лет в Англии для уменьшения объема перевозимых хлопка, сена и тому подобных продуктов. Поэтому точка зрения Паскаля была новой и оригинальной.

Как указывал Паскаль, два сообщающихся сосуда разных диаметров, плотно закрытые поршнями, являются машиной, действующей подобно рычагу: грузы, давящие на эти поршни, уравниваются в том случае, если их веса пропорциональны площадям поршней. При перемещении поршней соблюдается принцип возможных перемещений так же, как при движении сил, уравновешенных на рычаге или блоке.

Устанавливая единство закона, которому подчиняются как простые машины, так и сосуды, наполненные водой, Паскаль писал: «Надо признать, что в этой новой машине проявляется тот же постоянный закон, который наблю-

дается и во всех прежних — рычаге, блоке, бесконечном винте и так далее — и который заключается в том, что путь увеличивается в той же пропорции, как и сила».

Справедливость начала возможных перемещений в применении к рычагу, блоку и другим простым машинам следует из рассмотрения их движений. Но она совсем не так ясна в применении к жидкостям, хотя бы и заключенным в закрытые сосуды.

Разъясняя приложимость принципа возможных перемещений к жидкостям, Паскаль писал: «Человек, который давит на малый поршень и опускает его на дюйм, вытолкнет другой поршень лишь на одну сотую часть дюйма (в рассматриваемом Паскалем случае площадь малого поршня в сто раз меньше большего. — *Ф. Б.*). В самом деле, этот толчок происходит вследствие непрерывности воды, соединяющей один поршень с другим и обуславливающей то, что один поршень не может двигаться, не толкая другого; поэтому, когда малый поршень продвигнется на один дюйм, то вода, которую он вытеснил, встретит, толкая другой поршень, отверстие во сто раз большее и займет по высоте лишь сотую часть дюйма. Таким образом, путь относится к пути, как сила к силе».

Однако принцип возможных перемещений не получил дальнейшего применения в гидростатике в работах исследователей следующего века.

В XVII веке возникла и механика газов. Она начала развиваться после открытия давления атмосферы, проявившегося в действии, например, всасывающего насоса.

Механика газов в XVII веке

Древние натурфилософы думали, будто воздух заполняет все мировое пространство. Поэт-философ Лукреций Кар предполагал, что воздух поддерживает Землю «на весу», не давая ей упасть «вниз». Эту мысль он изложил в своей поэме «О природе вещей». Воззрения ученых XV—XVI веков на атмосферу также не были ясны. Леонардо да Винчи, например, не отошел еще от взглядов Лукреция.

В первой половине XVII века еще не было известно, что воздух с большой силой давит на земную поверхность. Действие воздушного насоса оставалось непонятым.

Даже проницательный ум Галилея остановился перед задачей правильно объяснить действие этой давно известной машины. Галилей как будто остался на почве аристотелевской физики, полагая, что вода поднимается вслед за поршнем насоса, так как природа «боится пустоты». Однако великий ученый уже указал, что эта «боязнь» проявляется лишь до высоты около 32,8 фута, или 10 метров, так как водяной столб не поднимается выше.

Такое ограничение «боязни» природы определенной высотой уже наводило на мысль, что поднятие воды насосом подчинено какому-то физическому закону.

Наконец, Торричелли открыто заявил, что «боязнь пустоты» — чистейший абсурд, хотя этот смелый отказ от мнения Аристотеля мог возбудить против него опасное в Италии недовольство представителей официальной науки.

Торричелли утверждал, что вода в насосе поднимается давлением воздуха. Чтобы проверить справедливость этого предположения, он решил сделать опыты с другими жидкостями: если оно справедливо, то высота столба жидкости должна быть обратно пропорциональна ее удельному весу.

Для первого опыта была выбрана очень тяжелая жидкость — ртуть, в 13,6 раза более плотная, чем вода.

Наполнив ртутью запаянную с одного конца стеклянную трубку и зажав открытый конец ее пальцем, Торричелли погрузил его в чашку с этой жидкостью. Ртутный столб в трубке, опустившись до высоты 28 дюймов (711 миллиметров), остановился. Над ним же осталось не заполненная ртутью пустота.

Высота столба ртути оказалась во столько раз меньше высоты водяного столба, во сколько ртуть тяжелее воды. Из наблюдения следовало, что водяной и ртутный столбы поддерживаются одинаковым давлением на единицу поверхности жидкости, которое могло быть приписано только давлению атмосферы.

Из подобных опытов, повторенных затем в различных вариантах, Торричелли вывел следствие: жидкость удерживается на такой высоте, чтобы давление ее было равно тому, которое производит столб ртути высотой 28 дюймов.

Это открытие сделало ясным, что «боязнь пустоты» — нелепость: наблюдаемое явление объясняется давлением воздуха на поверхность жидкости в чашке; однако дав-

ление воздуха, существование которого было известно еще в древности, не учитывалось до тех пор физиками.

Когда Паскаль узнал об опыте с ртутью, сделанном Торричелли, он заинтересовался этим опытом.

Паскаль в то время еще не отошел от аристотелианских взглядов. Ему хотелось самому на собственном опыте убедиться, справедливы ли они.

Если ртуть поддерживается давлением атмосферы, думал он, то на высокой горе столб ртути должен быть ниже, потому что толща воздуха над ее вершиной меньше, чем над равниной у ее подошвы.

Сделать эту проверку Паскаль попросил своего родственника, жившего в Клермоне, неподалеку от горы Пюи-де-Дом. Опыт показал, что по мере восхождения на гору ртутный барометр действительно медленно снижался. Когда же наблюдатель поднялся на высоту 4300 футов (около 1310 метров), то столб ртути упал больше чем на 3 дюйма (77 миллиметров).

Это наблюдение убедило Паскаля в правильности воззрений Торричелли, и он тотчас же отказался от аристотелианской «боязни пустоты».

«Легко понять, — писал Паскаль после этого опыта, — что у подножия горы воздух оказывает большее давление, чем на вершине ее, меж тем как нет никаких оснований предполагать, чтобы природа испытывала бóльшую боязнь пустоты внизу, чем вверху».

Паскаль объяснил давлением воздуха многие явления, казавшиеся до того непонятными, например присасывание, действие медицинских банок и т. п. Опыт с поднятием на гору навел Паскаля на мысль, что по давлению атмосферы можно определять высоту места над уровнем моря. Нужно было только найти зависимость между поднятием и изменением давления.

Различным давлением воздуха в соседних местностях объяснилось происхождение ветра.

Торричелли первый указал, что в теплые дни из церквей дует холодный ветер. «Находящийся в больших зданиях воздух, — писал он, — в это время значительно прохладнее и тяжелее, чем окружающий воздух. Поэтому он вытекает из двери подобно тому, как вытекала бы заключенная в здании вода, если бы внезапно устроили в стене его отверстие».

Интересуясь давлением атмосферы, Торричелли не ка-

сался прямо вопроса, волновавшего физиков того времени, — может ли в природе существовать «пустота».

Этой проблемой занялся живший тогда в Германии инженер Отто Герике (1602—1686).

Уроженец Магдебурга, Герике по окончании образования побывал в Англии и Франции. Он обладал большими познаниями в математике, механике и инженерном искусстве.

Во время Тридцатилетней войны Герике был вынужден, спасая жизнь, бежать в 1631 году с семьей из родного города. После этого он работал в разных немецких городах в качестве инженера по возведению укреплений.

Впоследствии Герике возвратился в Магдебург, где был избран бургомистром города. Это позволило ему отдавать много времени и средств физическим опытам.

Сперва Герике пытался получить пустое пространство в хорошо просмоленной бочке. Для этого он наполнил бочку водой, присоединил к ней насос и стал выкачивать воду. Скоро в бочке послышалось как бы кипение. Герике понял, что воздух проникает через поры дерева.

Тогда Герике заказал медный толстостенный полый шар и соединил его с воздушным насосом. Несколько рабочих с трудом выкачивали из шара воздух. Когда после этого открыли кран, воздух со свистом ворвался внутрь шара.

В 1654 году Герике произвел опыт, доказывавший существование давления атмосферы, в присутствии императора Фердинанда III и членов рейхстага в Регенсбурге.

Для этого опыта Герике взял большие медные полушария, плотно прилежавшие одно к другому пришлифованными краями, смазанными для герметичности салом. Сложенные полушария он соединил с воздушным насосом.

Когда воздух был выкачан, то силы восьми лошадей оказалось недостаточно, чтобы оторвать одно полушарие от другого. При открывании же крана трубки, соединявшей внутренность полушарий с атмосферой, воздух врывался внутрь их и они легко отделялись друг от друга.

Это явление, столь понятное в наше время, возбудило тогда чрезвычайное удивление.

Герике повторил также опыт, подтвердивший факт, что давление атмосферы может поддерживать водяной столб высотой не более 32 футов. Он выкачивал воздух из



Опыт Герике. На стойке укреплены полушария, из которых выкачан воздух. Атмосферное давление удерживает тяжесть гирь, поставленных на платформу, подвешенную к нижнему полушарию.

медного шара с отходившей от него трубкой и, погрузив затем зажатый пальцем конец трубки в чан с водой, открывал запорный кран. Вода через трубку заполняла весь шар. Удлиняя все больше трубку и поднимая выше шар, Герике убедился, что когда столб воды достигал высоты в 32 фута, то уже более не поднимался. Он даже заметил, что высота водяного столба не оставалась постоянной: она становилась то немного выше, то ниже в зависимости от погоды.

Опытами Торричелли, Паскаля и Герике было установлено, что воздух давит на все тела и на земную поверхность с силой около 15 фунтов на квадратный дюйм (около килограмма на квадратный сантиметр). Всех удивляло только, как люди и животные могут выдерживать такое огромное давление, не будучи раздавлены. Но позднее разъяснилось, что давление в кровеносных сосудах и полостях организмов равно атмосферному. Поэтому внешнее давление и не ощущается животными и людьми.

Если бы плотность воздуха не менялась по мере поднятия над уровнем моря, то толщину слоя атмосферы можно было бы определить простым расчетом: давление воздуха поддерживает столб воды высотой около 10 метров; значит, высота атмосферы во столько раз больше 10 метров, во сколько плотность воздуха меньше плотности воды. Слой воздуха был бы толщиной 8 километров.

В этом случае давление атмосферы уменьшалось бы обратно пропорционально высоте поднятия над уровнем моря. Например, на высоте 2 километров давление воздуха уравнивалось бы $760 \cdot \frac{3}{4} = 570$ миллиметров ртутного столба.

Значит, по величине давления легко было бы определять и высоту любого пункта, на котором произведено наблюдение.

Но атмосфера чем выше, тем становится разреженнее. Поэтому зависимость между высотой и давлением воздуха более сложна. Изучение этой зависимости обещало дать удобный способ для измерения высот пунктов над уровнем моря, которые определялись до того времени трудоемким процессом — нивелировкой.

Современник Герике, французский физик Эдм Мариотт (1620—1684) первый пробовал рассчитать изменение давления атмосферы с высотой.

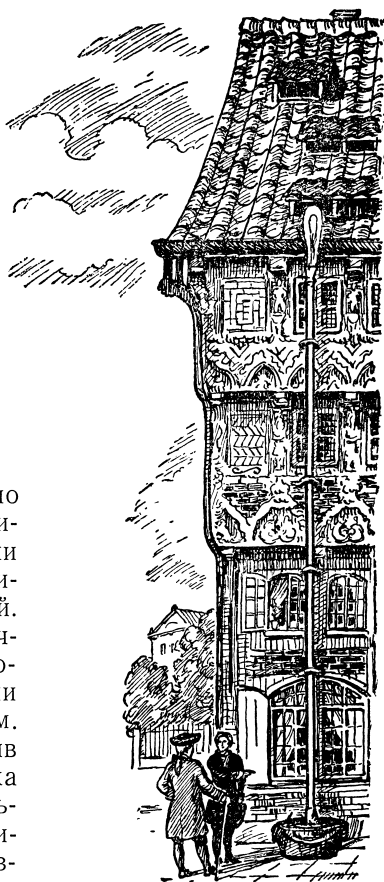


Имя Мариотта известно всем знакомым с курсом физики. Но о частной жизни этого человека не сохранилось почти никаких сведений. Мариотт оставил много научных трудов и с самого основания Парижской Академии наук был избран академиком.

Мариотт хотел, измерив изменение давления воздуха до некоторой высоты, в дальнейшем определять его вычислением. В своем расчете изменения давления с поднятием над земной поверхностью он исходил из наблюдений и открытого им (а еще ранее — Бойлем) закона, что плотность газа при неизменной температуре обратно пропорциональна давлению.

Измерение давления было сделано в самом глубоком подвале Парижской обсерватории и одновременно на вершине ее башни. Давление в подвале, конечно, оказалось немного больше.

Установив, на сколько меняется давление через каж-



Опыт Герике. Измерение давления атмосферы высотой водяного столба.

дые 5 футов (1,5 метра) высоты, Мариотт представил себе, что вся атмосфера состоит из слоев такой толщины. В каждом из них, как предположил он, давление меняется по отношению к лежащему ниже на одну и ту же величину. Исходя из таких соображений, Мариотт делал расчеты изменения давления с высотой.

В действительности зависимость между давлением и высотой над уровнем моря сложнее. Она выражается так называемой барометрической формулой.

Барометрическая формула позволяет определить высоту места наблюдения по давлению воздуха. Ею часто пользуются для этой цели в горных местностях.

Открытие закона колебаний маятника

Исследования Галилея были продолжены голландским физиком, математиком и астрономом Христианом Гюйгенсом (1629—1695).

Сын богатого землевладельца, Гюйгенс получил, по желанию отца, юридическое образование в Лейденском университете. Но юноша не хотел стать адвокатом: его влекли к себе астрономия, физика, математика и механические исследования.

С увлечением занимаясь оптикой, Гюйгенс сам шлифовал стекла и достиг в этом искусстве высокого совершенства. Он изготовил рефрактор, превосходивший по своим качествам все подобные инструменты астрономов своего времени. При помощи этого рефрактора он открыл, что планета Сатурн окружена светящимся кольцом и имеет спутника, которого ранее никто не мог увидеть.

Еще в возрасте двадцати двух лет Гюйгенс опубликовал свое первое математическое исследование, а вслед за ним — ряд других работ.

К тридцати годам Гюйгенс уже успел получить большую известность. В возрасте тридцати четырех лет он был избран в члены Лондонского Королевского общества, а через три года — в Парижскую Академию наук.

Король Франции отвел Гюйгенсу прекрасную квартиру при Королевской библиотеке в Париже. В Парижской Академии наук он пользовался большим влиянием и почетом. Но Гюйгенс был протестантом, а французы — католиками. В начале 80-х годов, когда во Франции началось

преследование протестантов, Гюйгенс уехал к себе на родину, в протестантскую Голландию. Там он поселился в Гааге, где и оставался до самой смерти.

Занимаясь оптическими исследованиями, Гюйгенс предположил, что свет есть колебание упругой материальной среды — эфира, заполняющего мировое пространство и промежутики между атомами. По теории Гюйгенса, от светящейся точки колебания расходятся подобно волнам на поверхности воды от упавшего камня. В пространстве они имеют сферический вид, так как распространяются во все стороны с одинаковой скоростью.

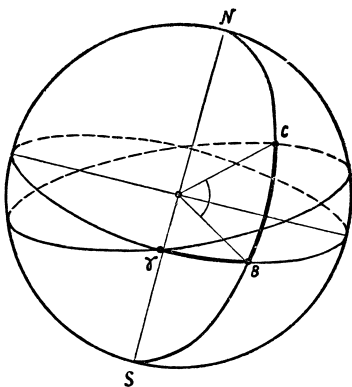
Пользуясь этой теорией, Гюйгенс вывел законы отражения и преломления света.

Как механик Гюйгенс прославился разработкой теории физического маятника.

В ту эпоху точное измерение времени приобрело особенное значение в астрономии в связи с задачей определения относительного положения звезд.

На земной поверхности место определяется географической широтой и долготой. Подобно этому, положение звезды на небесной сфере указывается ее расстоянием (в градусах) от небесного экватора и точки весеннего равноденствия¹.

Небесный экватор — проекция земного экватора на небесную сферу. Положение его можно определить, продолжив мысленно плоскость земного экватора до пересечения с небесной сферой. Если провести мысленно пло-



Положение звезды может определяться склонением, то-есть расстоянием ее от экватора (в градусах), считая по кругу склонения, который проводится через звезду и полюс мира перпендикулярно к экватору (дуга CB). Вторая координата — прямое восхождение, как называется дуга экватора, считая от точки весеннего равноденствия до пересечения круга склонения с экватором (дуга γB).

¹ В точке весеннего равноденствия Солнце находится в тот момент, когда оно переходит через небесный экватор из южного небесного полушария в северное (около 21 марта).

скость, перпендикулярную к плоскости экватора и проходящую через звезду и полюс мира, то пересечение этой плоскости с небесной сферой даст круг склонений.

Дуга этого круга от звезды до пересечения его с экватором есть склонение звезды. Дуга по экватору от точки весеннего равноденствия до пересечения круга склонений с экватором называется прямым восхождением звезды.

Склонение и прямое восхождение определяют положение каждой звезды на небесной сфере.

Когда измерено прямое восхождение одной звезды, то для определения этой координаты другой звезды можно воспользоваться точными часами.

Вследствие вращения Земли через плоскость меридиана места наблюдения в течение суток проходят все звезды и точка весеннего равноденствия. Момент прохождения через меридиан места наблюдения называется кульминацией. В течение часа каждая точка небесной сферы проходит дугу в 15° ; в течение минуты — в $15'$; в течение секунды — в $15''$.

Измерив разность времени между моментами кульминации звезды и точки весеннего равноденствия, мы определили бы прямое восхождение звезды. Очевидно, что разность времен между кульминациями двух звезд дает разность их прямых восхождений. Зная эту координату одной звезды, очень просто находим ее и для другой.

Чтобы производить такие измерения, нужно иметь точные часы. Поэтому и ученые-физики и конструкторы часов трудились над созданием точных приборов для измерения времени.

Гюйгенсу не было известно изобретение Галилеем маятниковых часов. Он совершенно самостоятельно пришел к мысли применить маятник вместо «билянца» для их регулирования. Это изобретение было сделано им в 1657 году.

Якорь и спусковое колесо Гюйгенса в том же виде применяются и в современных колесных часах: якорь, соединенный с маятником, зацепляет то правым, то левым концом за зубцы спускового колеса; при каждом полном колебании маятника колесо поворачивается на один зубец.

Одновременно Гюйгенс работал и над исследованием теории колебаний маятника, начатым еще Галилеем. Ре-

зультаты этих работ он изложил в прославившем его имя сочинении «Часы с маятником», изданном в 1673 году.

Галилей установил на опыте, что нити равной длины как с свинцовой пулей, так и с пробкой на конце совершают колебание в одинаковый период времени. Он убедился при этом, что периоды колебаний маятников пропорциональны квадратным корням из их длины.

Однако совершенно очевидно, что период колебания должен зависеть и от ускорения падения грузика. Например, на Луне, где ускорение свободного падения приблизительно в шесть раз меньше, чем на Земле, маятник (при одинаковой длине) должен колебаться медленнее.

Но как меняется период колебания маятника в зависимости от ускорения свободного падения, это удалось найти только Гюйгенсу, который вывел формулу для периода колебаний маятника.

Эта замечательная формула позволяет по периоду колебаний нитяного маятника определить ускорение свободного падения¹.

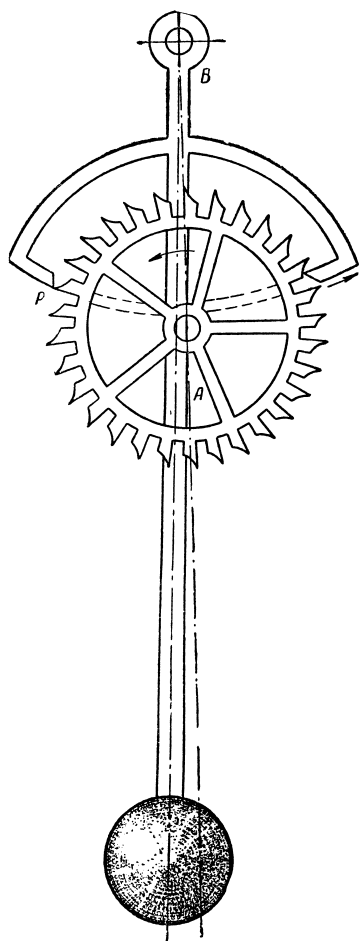
Формула Гюйгенса очень скоро нашла применение для измерения силы тяжести на земной поверхности.

До 70-х годов XVII века никто не подозревал, что сила тяжести не везде одинакова. Но в 1672 году один парижский астроном, посланный в экваториальную часть Америки для наблюдений, сделал удивительное открытие: оказалось, что маятниковые часы, идущие совершенно правильно в Париже, близ экватора начинают отставать.

Пришлось немного укоротить маятник, чтобы часы шли правильно. По возвращении же в Париж часы стали уходить вперед. Для исправления их хода уже понадобилось удлинить маятник.

¹ Гюйгенс доказал, что при малых размахах период полного колебания маятника относится ко времени свободного падения с высоты, равной его двойной длине, как длина окружности к ее диаметру. Если T — период колебания маятника, l — его длина, t — время свободного падения с высоты $2l$, то имеем пропорцию $T : t = 2\pi r : 2r$ и $T = \pi t$.

По законам же Галилея следует, что при свободном падении высота $2l = \frac{gt^2}{2}$, откуда $t = \sqrt{\frac{4l}{g}}$. Подставив это значение в предыдущую формулу, получим, что период полного колебания маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.



Регулирующее устройство в часах с маятником.

маятник. После этого стало возможным пользоваться формулой Гюйгенса и при наблюдениях над колебаниями физического маятника. Занимаясь исследованием колебаний маятника, Гюйгенс столкнулся с новым вопросом для механиков — взаимодействием между телами, соединенными связями в одну систему.

Это явление объяснилось тем, что сила тяжести по мере приближения к экватору немножко ослабевает, а к полюсу — усиливается.

Маятник скоро получил широкое применение при изучении изменения силы тяжести на земной поверхности.

В формулу Гюйгенса входит длина простого (математического) маятника, то-есть нерастяжимой и невесомой нити, на которой колеблется материальная точка.

Чтобы можно было пользоваться этой формулой, в течение всего XVIII века применяли для наблюдений нитяные маятники — тонкую нить с маленьким металлическим шариком на конце. Весом нити можно было пренебречь. Поэтому длиной маятника можно было считать расстояние от точки подвеса до центра шарика.

Гюйгенс разработал теорию и физического маятника, то-есть стержня с тяжелой чечевицей на конце, который применяется в часах. Он указал, как найти длину простого маятника, совершающего колебания в тот же период, как данный физический маятник.

Груз маятника связан с точкой подвеса посредством нити. Нить отклоняет грузик маятника от прямолинейного движения, сообщая ему ускорение к центру.

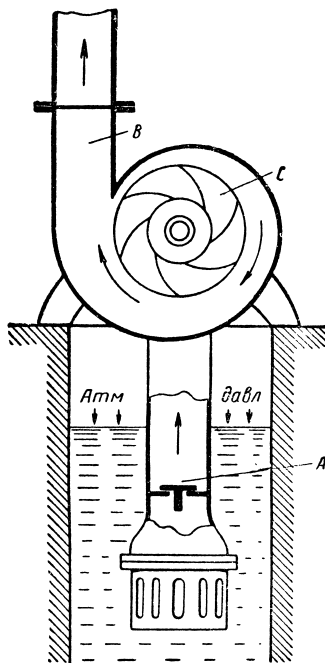
Грузик натягивает нить потому, что вследствие инерции он должен бы двигаться прямолинейно, но на него действует центростремительная сила натяжения нити.

У многих механиков сложилось неправильное представление о силах, действующих в подобной системе: они считали, что грузик, вращаемый на нити вокруг руки, находится под влиянием центробежной силы, которая удаляет его от руки. В действительности же центробежная сила действует (по третьему закону Ньютона) на нить и через нее на руку.

Поэтому центробежная и центростремительная силы, приложенные к разным телам, не могут уравновешиваться, как представляли себе эти механики.

Рассматривая движение грузика в течение очень короткого времени, когда можно считать, что он идет по диагонали параллелограмма, Гюйгенс вывел свою известную формулу $\frac{v^2}{r}$, где v — линейная скорость грузика, а r — длина нити. Это величина ускорения центростремительной силы.

Формула Гюйгенса имеет широчайшее применение в технике для расчета разного рода центробежных машин, регуляторов и тому подобных вращающихся механизмов.



Центробежный насос. Вращением заключенного в кожухе диска C приводится во вращательное движение находящаяся в кожухе вода. Вследствие этого частицы воды отлетают по касательным к их круговому пути в трубу B . Около оси диска в кожухе создается разрежение воздуха, и под влиянием атмосферного давления в кожух поступают новые частицы воды через клапан A .

Еще Гюйгенсом был осуществлен замечательный опыт, иллюстрирующий явления, происходящие при вращении тел.

В трубках, расположенных по радиусам круга, были помещены деревянные шарики. При вращении круга шарики откатывались вследствие инерции к окружности.

Когда же трубки наполнили водой, то вытесняемые более плотной водой шарики собирались в центре круга.

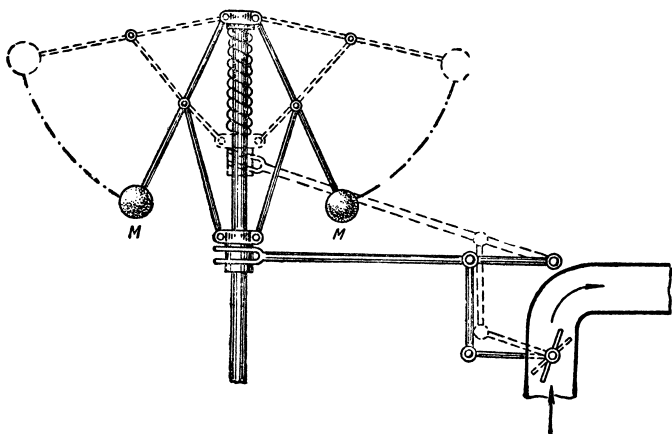
На этом явлении основано устройство сепаратора, широко распространенного в молочной промышленности.

Молоко наливается в цилиндрический сосуд, приводимый в быстрое вращение. Более легкие масляные частицы собираются возле оси вращения цилиндра и вытекают через отверстие наружу. Молоко, из которого выделены сливки, тоже удаляется из сепаратора.

Подобное же явление происходит в так называемых сушильных машинах, в которых выделяется вода из мокрого белья и других влажных предметов.

В паровых машинах впуск пара в цилиндры регулируется центробежными регуляторами.

Два маятника с тяжелыми шарами подвешены к верхнему концу стержня, вращающегося при работе паровой машины. Вследствие вращения маятники отходят от стержня, и тем больше, чем оно быстрее.



Центробежный регулятор. Поднявшиеся вследствие слишком быстрого вращения (показано пунктиром) шары М через тяги уменьшают впуск пара в трубу.

Если ход паровой машины слишком быстр, расходящиеся шары через тяги уменьшают выпуск пара. При нежелательном замедлении они, наоборот, увеличивают выпуск пара и ускоряют ход машины.

Удаление или приближение шаров к вращающемуся стержню происходит вследствие их инерции. Но еще недавно считали, что на шары действует центробежная сила, откуда и название регулятора — «центробежный».

Удар тел

Давление, производимое весом тела, издавна измерялось при помощи весов. Было известно, как изменяется оно в зависимости от веса тела. Давление каждого тела всегда остается одинаковым. Иное дело — удар. Ученых XVII века поражало, что удар небольшого, но быстро движущегося тела производит большее действие, чем давление значительно превосходящего его по тяжести: например, небольшим молотком можно легко забить в пень гвоздь, едва поддающийся давлению положенного на него тяжелого молота.

В чем же причина такого различия эффекта? Очевидно, в скорости движения, усиливающего действие маленького тела.

Галилей говорил, что давление производится «мертвым грузом». Отсюда уже было недалеко до понятия о «живой силе», введенного в механику во второй половине XVII века¹.

Удар — очень сложное физическое явление. При нем возникает взаимодействие тел, в котором не могли разобратся ни Галилей, ни Торричелли.

Законы удара, знание которых имело важное практическое значение для технических расчетов, оставались долго неизвестными.

Одним из первых, кто занимался проблемой удара, был Декарт. Он ввел в науку понятие о сохранении количества движения (так было названо произведение массы тела на скорость его движения). Но Декарт не открыл законов соударения тел, которые согласовались бы с наблюдениями.

¹ «Ж и в а я с и л а» — кинетическая энергия, равная полупроизведению массы на квадрат скорости.

Как философ Декарт считал движение неуничтожаемым. Но он не имел понятия о превращении движения тела в колебания частиц (молекул) вещества. Поэтому он ни при каких условиях не допускал возможности прекращения движения (перемещения) тела.

Между тем при соударении неупругих тел, движущихся навстречу друг другу, скорость движения как одного, так и другого тела уменьшается, и часть энергии движения переходит в энергию колебания частиц тела. Возможны случаи, когда ударившееся неупругое тело останавливается и энергия движения переходит в тепловую. Например, свинцовая пуля, ударившись о металлическую доску, расплавляется.

Во второй половине XVII века удар привлек большое внимание ученых. В 1668 году Лондонское Королевское общество назначило даже премию за решение этой проблемы.

Несколько ученых принялись за исследование соударения тел. Один из них, английский математик Джон Валлис (1616—1703), очень скоро разрешил задачу об ударе абсолютно неупругих тел (почти абсолютно неупругими можно считать воск, глиняное тесто и тому подобные тела), не отделяющихся друг от друга после удара.

Валлис, как и Декарт, не имел понятия о переходе видимого движения тела в невидимые колебания его молекул. Но он учел уменьшение скорости движения при столкновении неупругих тел, движущихся навстречу друг другу.

Основываясь на этом, Валлис считал, что количества движения могут быть положительными и отрицательными. Например, если движущееся вправо тело обладает положительным количеством движения, то у движущегося влево оно отрицательно.

При таком условии закон сохранения количеств движения мог быть применен ко всем случаям соударения тел. Исходя из него, можно путем несложного расчета определить общую скорость после соударения двух неупругих тел, а также перераспределение общего количества движения между ними¹.

¹ Здесь, как и дальше, рассмотрен лишь прямой удар шарообразных тел, при котором тела движутся по направлению линии, соединяющей их центры.

Труднее было найти законы соударения упругих тел.

Когда соударяются два абсолютно упругих шара, то на один момент они сжимаются. В этот момент количество движения перераспределяется между ними так же, как и при соударении неупругих тел. Но вслед за этим тела мгновенно возвращаются к прежней форме, воздействуя друг на друга.

Соударение упругих тел было исследовано теоретически Гюйгенсом более чем за десять лет до объявления конкурса Лондонским Королевским обществом. Гюйгенс не опубликовал свою работу только потому, что результаты его исследований не согласовались с «правилами удара» Декарта. Хотя эти «правила» противоречили опыту, но Гюйгенс не решился публично возражать Декарту.

Гюйгенс исходил из одного-единственного положения, что два равных упругих тела, ударяющихся друг о друга с равными скоростями, отскакивают одно от другого с теми же скоростями. Сочинение, в котором выведены из этого положения законы соударения упругих тел, было опубликовано после смерти автора, в 1703 году.

Вот как, например, Гюйгенс вывел из этого положения один из законов соударения абсолютно упругих тел.

Представим себе, что на лодке, плавно идущей вдоль набережной, сталкиваются два равных упругих шара, движущихся с одинаковой скоростью навстречу друг другу. При этом скорости движения шаров (относительно лодки) и самой лодки одинаковы, а шары катятся по линии, соединяющей корму с носом лодки.

Наблюдатель в лодке видит, что шары сближаются с одинаковой скоростью, а после удара покатаются каждый в обратном направлении.

Для наблюдателя с набережной тот из сближающихся шаров, движение которого по направлению обратно движению лодки, будет казаться неподвижным, а другой шар — движущимся к нему с удвоенной скоростью.

После удара, наоборот, шар, двигавшийся относительно наблюдателя на берегу, покажется остановившимся, а другой — катящимся с удвоенной скоростью.

Из этого опыта Гюйгенс вывел такое заключение: «если покоящееся тело ударяет другое равное тело, то это другое тело будет после удара покоиться, а покоившееся получит ту же скорость, какой обладало ударяющее».

В этом рассуждении Гюйгенс принял как неоспоримую истину, что соударение тел должно дать одинаковый результат как на судне, движущемся равномерно и прямолинейно, так и на суше, связав вывод своих законов с принципом относительности, установленным Галилеем.

Сделанный Гюйгенсом вывод, кажущийся парадоксальным, полностью оправдывается на опыте. Его справедливость подтверждается, например, при игре в бильярд упругими шарами из слоновой кости.

Когда катящийся шар ударяется о такой же покоящийся, то центры их сперва сблизятся. В этот момент, как и при ударе неупругих тел, оба шара должны бы получить половинную скорость первого из них в прежнем направлении.

Но упругость шаров сообщает каждому из них такую же скорость во взаимно противоположных направлениях. Поэтому ударивший шар остается на месте, так как его движение вперед парализуется толчком назад. А к половинной скорости шара, испытавшего удар, прибавляется еще такая же скорость от упругого толчка.

В результате ударивший шар останавливается, передав все количество своего движения другому шару, который приходит в движение со скоростью шара, нанесшего ему удар.

В рассмотренном случае оба шара имели одинаковую массу. Если их массы разной величины, то скорость ударяющего тела будет зависеть от соотношения масс.

Если масса ударяющего шара больше, чем покоящегося, то он не остановится, а будет двигаться в прежнем направлении, но с уменьшенной скоростью. Если же его масса меньше, чем покоящегося, то после удара он начнет двигаться в обратном направлении.

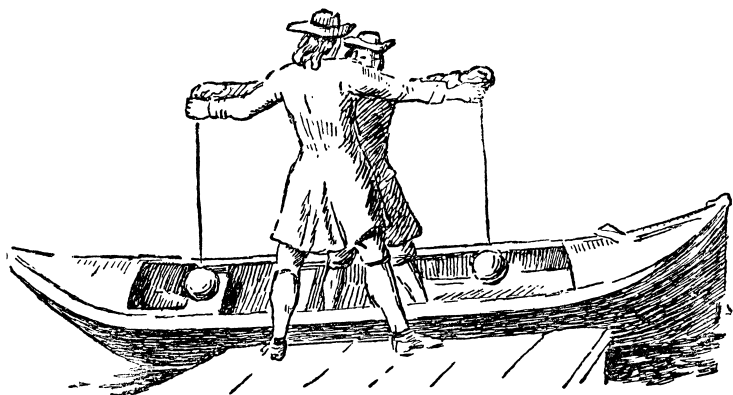
Тело, испытавшее удар, в обоих случаях движется в направлении ударяющего тела.

Гюйгенсу принадлежит и другая заслуга в теории удара. Он доказал, что при соударении абсолютно упругих тел сохраняется и сумма «живых сил», чего нет при ударе неупругих тел.

Выводы Гюйгенса подтвердились опытами Мариотта, устроившего для производства этих опытов специальный прибор. Ряд шаров из слоновой кости равных размеров был подвешен на нитях равной длины так, что шары соприкасались.

Отклонив крайний из них, отпускали его, чтобы он нанес прямой центральный удар в плоскости нитей. Тогда на другом конце ряда отскакивал один шар, поднимаясь на ту же высоту.

Это явление объясняется так: ударивший шар передает свое количество движения, или импульс¹, крайнему шару, а сам останавливается; крайний шар передает этот импульс следующему, и так далее; наконец последний шар отскакивает.



Воображаемый опыт Гюйгенса (соударение тел).

Гюйгенс доказал, что при соударении упругих тел передается как импульс, так и «живая сила». Отскочивший шар обладает тем же импульсом и той же «живой силой», как и шар, нанесший удар.

Но что произойдет, если удар нанесут два шара? Опыт показывает, что в этом случае отскакивают два шара — иначе не могли бы сохраниться одновременно и количество движения и кинетическая энергия.

Например, если бы мог отскочить один шар с вдвое большей скоростью, то количество движения осталось бы неизменным. Зато «живая сила» отскочившего шара была

¹ Импульс характеризует действие силы в течение некоторого промежутка времени. Пусть сила $f = ma$ (где a — ускорение) действует в течение времени t . Импульс силы $ft = mat$, но $at = v$ и $ft = mv$, то-есть импульс равен количеству движения в конце времени t .

бы вдвое больше, чем у двух шаров, нанесших удар, что невозможно.

Удар действует в течение чрезвычайно короткого времени, сообщая, однако, заметное, а иногда и значительное ускорение. Если бы его действие продолжалось секунду, то ускорение было бы очень велико.

Но сила измеряется произведением массы на ускорение. Значит, сила удара огромна. Этим пользуются при забивании гвоздей и свай, при рубке топором и других работах.

Практически невозможно определить ускорение, сообщаемое ударом в течение чрезвычайно короткого времени. Поэтому нельзя определить и силу удара как произведение массы тела на ускорение.

Измерению доступна только скорость, сообщенная ударом телу. Поэтому о силе удара судят по количеству движения. В этом особенность так называемых мгновенных сил.

Изучение удара тел имело большое значение в технике. На законах соударения тел основан, например, баллистический маятник, долгое время применявшийся для измерения скорости движения ядер при вылете из орудия.

Баллистический маятник представлял собой подвешенный массивный ящик с большим котлом внутри, наполненным песком. Выброшенное из орудия в горизонтальном направлении ядро попадает в котел и останавливается в песке. Баллистический маятник приходит в движение и, откатнувшись, поднимается на некоторую высоту.

По высоте поднятия маятника над уровнем, когда он висел спокойно, можно вычислить скорость, сообщенную ему снарядом. Она равна $v = \sqrt{2gh}$, где h — высота, на которую поднялся маятник¹. Зная высоту h , легко находим и v .

После соударения маятник и снаряд обладают количеством движения, равным $(M + m)v$, где M — масса маят-

¹ Тело, упавшее с высоты h , проходит расстояние $\frac{gt^2}{2} = h$ и приобретает скорость $v = gt$. Определив из первой формулы $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ и подставив во вторую формулу, находим $v = g\sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2h}{g} \cdot g^2} = \sqrt{2gh}$.

ника, m — масса снаряда, v — скорость движения маятника. Все эти величины известны.

Это количество движения принадлежало до соударения снаряду. Оно равнялось mV , где V — скорость движения снаряда.

По закону сохранения количества движения можем написать: $mV = (M + m)v$, откуда и определяется скорость снаряда $V = \frac{(M + m)v}{m}$.

Рассмотренный случай взаимодействия движущихся тел представляет собой пример изолированной системы. В такой системе общее количество движения остается неизменным, какие бы процессы в нем ни происходили.

Допустим, что летящий снаряд взорвался в воздухе. Осколки его разлетятся во все стороны. Если сложить количество движения всех осколков, принимая, конечно, во внимание направление их движения, то сумма будет равна количеству движения снаряда до взрыва.

Возникновение идеи о всемирном тяготении

Непосредственное действие давления и удара одним телом другого казалось всем понятным: оно является следствием непроницаемости тел.

Но как Земля заставляет падать на ее поверхность брошенное тело? Как воздействует Солнце на планеты, удерживая их на орбитах?

Коперник, размышлявший о строении солнечной системы, не ставил себе этих вопросов. Не думал о природе тяжести и Галилей, исследуя законы свободного падения тел. Впервые на вопрос о причине движения планет по орбитам пытался ответить современник Галилея — немецкий астроном Иоганн Кеплер (1571—1630).

Биография Кеплера — яркий пример тяжелых условий жизни в средневековой Европе. Сын протестанта, Кеплер испытал много неприятностей вследствие розни между лютеранами и правоверными католиками. Он подвергся изгнанию из Штирии в числе других протестантских преподавателей школ. Мать Кеплера была обвинена в колдовстве. Ей угрожало сожжение живой на костре, и Кеплеру стоило большого труда избавить ее от этой жестокой казни.

По окончании Тюбингенского университета Кеплер поступил на должность учителя математики высшей школы в Граце. На него же была возложена обязанность редактировать издания календаря, в котором делались предсказания погоды и различных событий на весь год.

«Законодатель неба» Кеплер был вынужден заниматься астрологией—предсказанием по звездам судьбы людей.

В 1600 году Кеплера пригласил знаменитый датский астроном Тихо Браге (1546—1601) для участия в составлении планетных таблиц. Но уже в следующем году он умер, а Кеплер самостоятельно продолжал эту работу в Праге в качестве придворного математика императора Рудольфа.

Высокое звание не избавило, однако, Кеплера от бедности, угнетавшей его в течение всей жизни. Но, несмотря на все затруднения, он нашел время и силы, чтобы вывести из наблюдений Тихо Браге путем очень сложных вычислений законы движения планет.

В то время все были уверены, что планеты обращаются по кругам и движутся равномерно, хотя действительные перемещения их среди звезд не согласовались с этим утверждением.

Работая над составлением планетных таблиц, Кеплер никак не мог получить нужные результаты, исходя из кругового равномерного движения планет. Тогда он стал делать различные предположения о форме их орбит, пытаясь объяснить движение Марса.

Не движутся ли планеты по овальным орбитам, то удаляясь, то приближаясь к Солнцу? Кеплер начертил овальную кривую — эллипс, поместив в центре ее Солнце. Но и теперь не получилось совпадения с действительным движением планеты.

Но, может быть, Солнце находится не в центре, а в одном из фокусов эллиптической орбиты Марса?

При этом предположении движение планеты лучше согласовалось с наблюдаемым в действительности. Но все-таки планета то немного отставала, то опережала теоретическое движение по эллиптической орбите.

Оставалось предположить, что движение планеты неравномерно: ближе к Солнцу оно быстрее, в отдалении — медленнее, причем радиус-вектор (линия, соединяющая планету с Солнцем) описывает в равные времена равные площади.

Так Кеплер открыл свои первые два закона.

Через десять лет он вывел и третий закон, что квадраты периодов обращения планет относятся как кубы их средних расстояний от Солнца.

Но почему планеты подчиняются этим законам? Кеплер не мог ответить на этот вопрос. Однако он стоял на пути, который мог привести его к открытию причины движения планет по эллиптическим орбитам. Кеплер предполагал, что планеты удерживаются притяжением их к Солнцу, а Луна — притяжением к Земле.

«Земля и Луна, — писал Кеплер, — если бы их обращение не поддерживалось какой-нибудь живой силой, должны были бы соединиться между собой, причем Луна приблизилась бы на 53 части, а Земля — на одну часть их взаимного расстояния, если предположить плотность обоих тел одинаковой».

Но Кеплер не знал законов динамики Галилея. Поэтому он не мог объяснить движения планет, исходя из притяжения между ними и Солнцем.

Во второй половине XVII века ученые больше приблизились к разгадке проблемы обращения планет. Некоторые математики уже поняли, что планеты двигались бы по инерции прямолинейно, а притяжение Солнца искривляет их пути.

В истории науки отмечено, что открытие, обычно приписываемое одному ученому, готовилось многими его предшественниками. Ум человека постепенно приближался к познанию физических законов, пока наконец усилием гения делалось их открытие.

Так было и с законом всемирного тяготения, о существовании которого догадывались многие ученые.

В 1666 году итальянский астроном Джованни Борелли (1608—1679) уже близко подошел к идее о тяготении между Солнцем и планетами. Он указывал, что тело, движущееся по кругу, «стремится» удалиться от центра. Но так как планеты удерживаются на своих орбитах — значит, какая-то сила притягивает их к Солнцу, не давая им уйти в пространство.

Гюйгенс даже вывел формулу для вычисления ускорения к центру тел, движущихся по круговым путям.

Но наиболее полную картину механизма солнечной системы, управляемого тяготением планет к Солнцу, до Ньютона дал английский физик Роберт Гук (1635—1703).

Гук был по богатству высказанных им физических идей замечательным ученым.

Сын пастора, он окончил Оксфордский университет и стал ассистентом знаменитого английского физика Бойля.

В 1662 году он получил место экспериментатора при Лондонском Королевском обществе, а через несколько лет был избран в члены этого общества и стал его секретарем. Одновременно он читал лекции по механике и преподавал геометрию в Грешемской коллегии в Лондоне.

Несомненно, что Гук обладал большими способностями и у него было много новых идей. Помимо того, общаясь с членами Лондонского Королевского общества и знакомясь с их работами, он имел широкий кругозор.

Но, постоянно разбрасываясь, он не мог сосредоточиться на каких-либо вопросах и не доводил до логического конца своих мыслей.

Очень часто, когда тот или другой ученый сообщал новое открытие или идею, то оказывалось, что у Гука еще раньше была та же мысль. При этом Гук вступал в ожесточенные споры, защищая свой приоритет.

Например, когда Гюйгенс сообщил в 1675 году об изобретении маятниковых часов, Гук заявил, что это изобретение было сделано им раньше, но не опубликовано.

Гюйгенс благородно согласился и не оспаривал его первенства, хотя он построил маятниковые часы, а Гук не привел в исполнение свою идею.

Гук так часто вступал в споры о первенстве, что даже получил прозвище «всемирного претендента».

В 1674 году Гук опубликовал большую статью, в которой он объяснил механизм планетных движений.

«Все небесные тела, — писал он, — производят притяжение к их центрам, притягивая не только свои части, как мы это наблюдали на Земле, но и другие небесные тела, находящиеся в сфере их действия... всякое тело, получившее однажды простое прямолинейное движение, продолжает двигаться по прямой до тех пор, пока не отклонится в своем движении другой действующей силой и не будет вынуждено описывать круг, эллипс или иную сложную линию... притягивающие силы действуют тем больше, чем ближе тело, на которое они действуют, к центру притяжения».

Но как вывести из этого предположения законы Кеплера, которым подчиняется движение планет? На такой

вопрос Гук не мог ответить. Чтобы решить эту задачу, нужно было, во-первых, установить, как изменяется сила притяжения с расстоянием, и, во-вторых, владеть математическим методом. Гук же не обладал большими математическими познаниями.

Заложение основ небесной механики

Инерция, законы свободного падения и центростремительного ускорения были важнейшими открытиями в механике. Но ни Галилей, ни Гюйгенс не привели в систему механические познания своего времени.

Возвести стройное здание механики, дать строгие формулировки и доказательства ее принципам и, наконец, создать небесную механику оказалось по силам только английскому физiku и математику Исааку Ньютону (1643—1727).

Ньютон родился на ферме в деревне Вульсторп, в маленьком каменном домике, сохранившемся до наших дней. Грамоте он выучился в сельской школе.

В детстве Ньютон проявил большую склонность к постройке моделей машин: однажды он сделал маленькую мельницу, приводившуюся в движение посаженной в нее мышью.

Двенадцати лет Ньютон был отдан в городскую школу в Грэнтаме, а через три года он возвратился к матери на ферму, чтобы помогать ей в хозяйстве. Но нередко, посланный матерью по делам фермы, Ньютон забывал данное ему поручение, увлекшись решением какой-либо математической задачи.

Однажды его дядя, ученый-священник Эйскоу, застал мальчика врасплох за этим занятием. Видя такие наклонности Ньютона, он убедил его мать отдать мальчика обратно в школу для подготовки в университет.

Так и сделали. В 1661 году Ньютон уже был в Кембридже.

Сурово встретила новая жизнь юношу Ньютона. Не имея средств, он должен был выполнять, по обычаю того времени, обязанности слуги магистров и докторов университета.

Курс университета начался изучением арифметики, геометрии по Евклиду, тригонометрии и древних языков.

Этими науками Ньютон овладел очень быстро. В университете студенты имели возможность не только изучать наследие старой науки, но и знакомиться с новыми идеями в ней. Им предоставлялась широкая возможность в выборе предметов изучения и самостоятельного научного творчества. Эти условия очень благоприятствовали развитию самобытного гения Ньютона.

Большое влияние на Ньютона оказал его профессор математики Исаак Барроу (1630—1677), переводчик творений античных геометров: Архимеда, Евклида и Аполлония.

В 1665 году Ньютон окончил университет, получив звание бакалавра.

В течение 1665—1667 годов, когда в Англии свирепствовала чума, Ньютон жил в тиши своего дома на ферме. Свободный от обязанностей, избавленный от столкновений и недоброжелательства, он предавался размышлениям и именно тогда сделал главнейшие свои открытия в математике, физике и механике.

В годы пребывания в Вульсторпе Ньютон создал анализ бесконечно малых величин («метод флюксий»), объяснил обращение Луны вокруг Земли и произвел свой знаменитый опыт с разложением и сложением луча света.

Но Ньютон не торопился сообщать о сделанных им открытиях ученому миру. Целые годы и десятки лет он хранил про себя результаты своих исследований, чтобы избежать поднимавшихся при опубликовании открытий споров с членами Лондонского Королевского общества.

«Я убедился, — писал Ньютон в 1676 году секретарю Лондонского Королевского общества, — что либо не следует сообщать ничего нового, либо придется тратить все силы на защиту своего открытия».

После прекращения чумы Ньютон возвратился в Кембридж, где в 1669 году занял в университете кафедру математики, уступленную Барроу своему гениальному ученику.

Чтение лекций не отнимало много времени у Ньютона. Нередко он возвращался домой даже не начиная лекции, потому что как лектор он не пользовался популярностью и иногда в аудитории не было ни одного слушателя. Зато он мог отдавать больше времени научным исследованиям, забывая о часах завтрака и обеда. Сну он уделял не более пяти часов, допоздна работая в лаборатории.

В 1671 году он построил второй отражательный телескоп и послал его в Лондонское Королевское общество. За изобретение телескопа Ньютон был избран в члены этого общества.

Наибольшее внимание ученых той эпохи привлекало движение планет. Законы Кеплера, которым подчинялись эти движения, были чисто эмпирическими выводами. Они не указывали, какие силы заставляют двигаться планеты, подчиняясь этим законам.

Над проблемой планетных движений размышлял и Ньютон. Еще в Вульсторпе он сделал расчет движения Луны вокруг Земли, исходя из представления, что она непрерывно «падает» на Землю. При этом Ньютон руководствовался принципами динамики Галилея.

Ньютон сравнивал движение Луны и брошенного с Земли тела. Под влиянием притяжения Земли тело испытывает центростремительное ускорение к ней и падает. Но чем больше его начальная скорость, тем дальше пролетит оно.

При достаточной скорости оно никогда не упадет обратно. Нетрудно было определить, какова должна быть скорость, чтобы брошенное горизонтально тело не упало, а обращалось бы вокруг Земли: если бы тело двигалось с такой скоростью по круговому пути, то ускорение центростремительной силы, удерживающей его на круговой орбите, равнялось бы ускорению силы тяжести на земной поверхности. Из этого соображения легко рассчитать по формуле Гюйгенса, что тело должно двигаться со скоростью около 8 километров в секунду¹.

Следовательно, и Луна может двигаться вокруг Земли, удерживаемая тяжестью, думал Ньютон.

Вот что писал он о том, как пришел к этому открытию: «Я начал размышлять о действии тяжести, простирающейся до орбиты Луны, и, найдя, как вычислить силу, с которой тело, обращающееся внутри сферы, давит на поверхность этой сферы, я вывел из закона Кеплера... что сила, удерживающая планеты на их орбитах, обратно пропорциональна квадратам их расстояний от центров обращения».

¹ Если $\frac{v^2}{r} = 9,81$ метра, то $v = \sqrt{9,81 \cdot 6371 \cdot 10^3} = 7906$ метров.

Исходя из этого представления, Ньютон рассчитал центростремительное ускорение Луны к Земле. Если это ускорение происходит вследствие притяжения Луны Землей, то оно должно быть одинаково с ускорением силы тяжести на расстоянии Луны.

Но когда Ньютон сделал вычисление, не получилось вполне точного совпадения. Это объясняется тем, что тогда не была известна точная величина земного радиуса, и Ньютон с огорчением прекратил свое исследование.

Только в 70-х годах XVII века, после нового градусного измерения во Франции, была получена точная величина земного радиуса. Когда Ньютон узнал об этом, он повторил свои вычисления и доказал, что путь Луны искривляется действием той же силы, как и падающего тела, то есть тяготением к Земле.

После этого для Ньютона не представляло большого труда вывести, что и планеты движутся вокруг Солнца, постоянно «падая» к нему.

Так Ньютон открыл всемирное тяготение между телами вселенной, управляющее их движениями. В то время и другие ученые очень интересовались возможностью объяснить движение планет по эллиптическим орбитам притяжением их Солнцем.

Попытку такого объяснения сделал друг Ньютона — английский астроном Эдмунд Галлей (1656—1742). Галлей (по его словам) доказал, что если движения планет подчиняются третьему закону Кеплера, то сила притяжения их Солнцем должна меняться обратно пропорционально квадратам расстояния их от Солнца. Галлею, однако, не удалось определить форму планетных орбит.

Посетив Ньютона, Галлей сообщил ему об этих расчетах. Тогда Ньютон поделился с ним открытием закона всемирного тяготения. Галлей стал настаивать, чтобы Ньютон опубликовал его.

Только через год с большой неохотой Ньютон представил в Лондонское Королевское общество рукопись «О движении» с изложением основ механики. При этом он просил не публиковать его работу, а только зарегистрировать в протоколах общества для защиты приоритета ее автора. Наконец в 1686 году он прислал в общество свой замечательный труд — «Математические начала натуральной философии».

В архивах Лондонского Королевского общества есть

запись, что в этом труде Ньютона «дается математическое доказательство гипотезы Коперника в том виде, как она была предложена Кеплером, и все небесные явления объясняются на основании единственного предположения о тяготении к центру Солнца обратно пропорционально квадрату расстояния».

«Начала» Ньютона были изданы Лондонским Королевским обществом на средства Галлея в 1687 году.

Исходя из обратной пропорциональности силы тяготения квадрату расстояния, Ньютон математически доказал, что под действием тяготения планеты должны двигаться по эллиптическим орбитам и что радиус-вектор должен в равные времена описывать равные площади — законы, найденные Кеплером из наблюдений движения планет.

Закон всемирного тяготения оказался применимым к объяснению многих явлений, остававшихся непонятными до того времени.

Например, движение планет, подчиняясь в общем законам Кеплера, все-таки немного отстывает от них. Такие «неравенства» в движении планет представляли загадку для астрономов.

Ньютон объяснил это явление «возмущениями», которые производит тяготение планет друг к другу.

Наибольшие «неравенства» наблюдаются в движении Луны, возмущаемом могучим притяжением Солнца. Одно из них происходит, например, вследствие изменения формы лунной орбиты.

Когда Луна и Солнце находятся в одной стороне от Земли, то Солнце оттягивает ее от Земли. Через пятнадцать дней уже Земля окажется между ними; тогда она оттягивается Солнцем от Луны. Вследствие этого постепенно укорачивается длинная и удлиняется короткая оси лунной орбиты.

Подобным образом объясняются и «неравенства» в движениях планет, производимые их взаимным притяжением.

Приливы и отливы также оставались загадочным явлением до открытия всемирного тяготения.

Ньютон объяснил морские приливы притяжением океанических вод Луной. Луна действует на каждую часть Земли. Частицы воды, находящиеся прямо под Луной, ближе к ней, чем центр Земли, на величину земного радиуса. В противоположной точке земной поверхности

они настолько же дальше от нее по сравнению с центром Земли.

Притяжение Луны сообщает всем точкам Земли ускорение, обратно пропорциональное квадратам расстояний. Ускорение частиц под Луной больше, чем ускорение центра Земли. Наоборот, в противоположной точке оно настолько же меньше его.

Поэтому прямо под Луной и в противоположной точке земной поверхности поднимается бугор прилива.

Разгадка причины приливов и отливов была не меньшим торжеством закона всемирного тяготения, чем и объяснение движения планет.

Ньютон считал частицы материи центрами силы притяжения, взаимодействующими между собой на расстоянии без посредства каких-либо материальных частиц. Но он не стремился раскрыть, что такое тяготение. Он не утверждал, например, что тяготение — свойство материи.

«Я отнюдь не утверждаю, — писал он, — что тяготение существенно для тел. Под врожденной (присущей телам. — *Ф. Б.*) силой я разумею единственно только силу инерции. Она неизменна. Тяжесть при удалении от Земли уменьшается».

Всемирное тяготение — это принцип, выведенный из наблюдений движения планет: планеты движутся так, как будто Солнце притягивает их с силой, обратно пропорциональной квадратам расстояний.

Этот принцип не может быть отвергнут, потому что он выведен из наблюдений.

Гипотезой можно считать лишь утверждение, что каждая частица одного тела тяготеет к каждой частице другого и потому сила тяготения между двумя телами прямо пропорциональна их массам. Но все расчеты, сделанные на основе этого предположения, оправдываются наблюдениями.

Поэтому, не зная, в чем заключается причина тяготения тел друг к другу, астрономы признали, что оно действительно существует.

Целью «Начал» было математическое объяснение движения небесных тел, исходя из принципа всемирного тяготения. Но Ньютон не ограничился этим. Он привел в стройную систему механические познания того времени и внес ясность в понятия о силе и массе. Поэтому Ньютон считается основоположником современной механики.

Механика Ньютона

Ньютон впервые ввел в механику понятие о массе. До него обычно говорили о ней как о весе тела. Вес тела определял количество вещества в нем.

Но, открыв закон всемирного тяготения, Ньютон уже знал, что масса и вес — не одно и то же.

С древнейших времен люди измеряли массу тела весом, как количество материи.

Ньютон поэтому и дал такое определение массы: «Количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему», поясняя далее, что опытным путем масса определяется по весу тела, «ибо она пропорциональна весу, что мною найдено опытами над маятниками...»

Определение массы Ньютоном согласовалось с представлением атомистов о строении тел: чем больше в определенном объеме атомов, тем больше и масса тела.

Но вес тела меняется в зависимости от расстояния его до центра тяготения — он не может быть мерой массы. Как же измерить массу независимо от веса тела?

И вот Ньютон ввел понятие об измерении массы ее инерцией. «Врожденная сила¹ материи есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно предоставлено самому себе, удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Эта сила пропорциональна массе».

Об инерции тела дает ясное понятие следующий опыт.

Допустим, что между двумя легкоподвижными, маленькими одинаковыми тележками зажата спиральная пружина. Тележки связаны ниткой, не позволяющей пружине расправиться. Они стоят на рельсах, вдоль которых уложена длинная линейка с делениями. Разрезав острыми ножницами нитку, мы освободим пружину.

Быстро расправившись, пружина толкнет тележки, и они откатятся на одинаковое расстояние. Но если одну из тележек нагрузить свинцовой дробью так, чтобы она вместе с грузом весила вдвое больше, чем другая, то нагруженная тележка откатится на расстояние, вдвое меньшее, чем пустая.

¹ Инерция, конечно, есть свойство материи, а не сила.

И где бы мы ни сделали этот опыт — на полюсе или на экваторе, — тележки откатятся везде на одно и то же расстояние. Даже если бы мы произвели его на Луне, где тяжесть тележек и груза уменьшилась бы почти в шесть раз, тележки под действием толчка распрямляющейся пружины откатились бы на такое же расстояние, как и на поверхности Земли.

Впервые Ньютон ввел в механику ясное понятие и о силах, не касаясь, однако, их природы. По Ньютону, сила есть причина движения. Она сообщает ускорение телу.

Основные законы механики Ньютон выразил в такой форме:

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

2. Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

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

Первый закон представляет собой только новую формулировку понятия об инерции, введенного в механику еще Галилеем.

Второй закон практически применялся Галилеем и Гюйгенсом. Но отсутствие ясного представления о силе не позволило до Ньютона дать ему точное выражение.

Зная первые два закона, можно определить, как будет двигаться тело под действием на него сил. Но наблюдения показали, что тела природы взаимно действуют одно на другое: если лошадь тянет телегу, то и телега с той же силой оказывает сопротивление лошади, действующее через упряжь.

Третий закон Ньютона обобщает это явление на все тела природы: Земля притягивает Луну, но и Луна с такой же силой притягивает Землю; то же взаимодействие существует между всеми телами вселенной.

Установление этого закона было большим шагом в развитии механики. Оно позволило правильное понятие движение планет.

Мы говорим, что Луна под влиянием притяжения Зем-

ли обращается вокруг нее. В действительности же Земля и Луна под влиянием взаимного притяжения обращаются вокруг общего центра их масс, лежащего на расстоянии около 4700 километров от центра Земли.

Только большое превосходство массы Солнца создает представление, будто планеты обращаются вокруг него. На самом же деле каждая планета и Солнце обращаются вокруг общего центра их масс.

Это явление совершенно очевидно у двойных звезд, у которых различие масс часто бывает невелико.

В механике Ньютона получило строгое выражение и понятие об относительности движений, на которую указывал еще Галилей. В доказательство относительности движений Галилей приволил следующий опыт.

«В большой каюте под палубой какого-нибудь крупного корабля, — писал он, — запритесь с кем-либо из ваших друзей и устройте так, чтобы в ней были мухи, бабочки и другие летающие насекомые; возьмите также большой сосуд с водой и рыбок внутри него; приладьте еще какой-либо сосуд повыше, из которого вода падала бы по каплям в другой, нижний сосуд с узкой шейкой; и пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте внимательно, как эти насекомые будут с одинаковой скоростью летать по каюте в любом направлении; вы увидите, как рыбки начнут двигаться безразлично в направлении какой угодно части края сосуда; все капли воды, падая, будут попадать в сосуд, поставленный снизу... Когда вы хорошо заметите все эти явления, дайте движение кораблю, и притом с какой угодно скоростью, тогда (если только движение его будет равномерным, а не колеблющимся туда и сюда) вы не заметите ни малейшей разницы во всем, что было описано, и ни по одному из этих явлений вы не сможете удостовериться, движется ли корабль или стоит неподвижно».

Из этого опыта следовало, что все механические явления и законы, выведенные из наблюдений на неподвижной суше, справедливы и в каюте плывущего судна, перемещающегося равномерно и прямолинейно относительно берега.

При изучении движений мы определяем положение тела относительно точки, принимаемой за неподвижную. Например, находясь в вагоне — относительно его угла: предметы, не меняющие места относительно него, счита-

ются неподвижными. Но вагон со всеми предметами и наблюдателем внутри него катится по рельсам. Условно говорят, что движется пространство, относительно которого определяется положение тел в вагоне.

Применяя это выражение, Ньютон и дал определение принципа относительности движений: «относительные движения друг по отношению к другу тел, заключенных в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится ли это пространство или движется равномерно и прямолинейно без вращения».

Законы, выведенные в одном пространстве, справедливы и в другом, движущемся относительно него равномерно и прямолинейно. Чаще говорят о движущихся не «пространствах», а системах.

Вагон — движущаяся система относительно Земли, Земля — относительно Солнца, Солнце и планеты — относительно звезд...

Находясь в системе, движущейся равномерно и прямолинейно, наблюдатель не может установить, движется ли он или находится в состоянии покоя.

Вторая книга «Начал» посвящена изучению движения тел в среде, оказывающей сопротивление (внутреннее трение), зависящее от скорости движущегося тела. Ньютон рассматривал случаи, когда сопротивление среды пропорционально скорости. Он исследовал круговое движение в сопротивляющейся среде и колебание в ней маятника.

Эту книгу Ньютон закончил исследованием вихревых движений в жидкости. Он доказывал, что если бы планеты переносились в пространстве вихрями тонкой материи, как учил Декарт, то они не двигались бы по законам Кеплера.

«Таким образом, — писал он, — гипотеза вихрей совершенно противоречит астрономическим явлениям и приводит не столько к объяснению движений небесных тел, сколько к их запутыванию. Способ, которым эти движения совершаются на самом деле в свободном пространстве, можно понять по первой книге, подробнее же он рассматривается в изложении системы мира».

Открытие всемирного тяготения раскрыло механизм, управляющий движениями всех тел вселенной: от метеоритов и комет до звезд и галактик. Оно легло в основу «небесной механики», изучающей движение космических тел.

Но обаяние имени Декарта, ниспровергнувшего аристотелианство в механике, долго препятствовало признанию всемирного тяготения на континенте Европы. Французские ученые упорно держались взглядов Декарта. Только к началу 40-х годов XVIII века Ньютон был признан и во Франции. Но с той поры именно французы, а не англичане развивали в течение всего XVIII века учение Ньютона.

Одной из причин, задержавших распространение механики Ньютона, был примененный им геометрический метод доказательств.

Эти доказательства очень кратки и изящны. Но понимание их требует большого воображения. Говорили, будто во всей Англии в эпоху выхода в свет «Начал» Ньютона было не более десятка ученых, способных понять этот труд.

Возникновение аналитической механики

Изложив доказательства теорем механики геометрическим методом, Ньютон при их выводе иногда пользовался изобретенным им «исчислением флюксий». Одновременно с Ньютоном исчисление бесконечно малых было изобретено немецким философом и математиком Готфридом Вильгельмом Лейбницем (1646—1716). В XVIII веке анализ бесконечно малых был развит математиками континента Европы. Он получил широкое применение в механике и обеспечил быстрые успехи этой науки.

Аналитическое направление механики было создано главным образом трудами замечательного математика Леонарда Эйлера (1707—1783).

Молодой Эйлер готовился к духовному званию. Но уроки, которые он брал у известного математика Иоганна Бернулли, изменили его намерения. Эйлер ревностно взялся за изучение математики.

Эйлеру было только двадцать лет, когда его пригласили в Петербургскую Академию наук занять кафедру... физиологии. Он спешно взялся за изучение этой науки и принял предложение.

В день прибытия Эйлера в Петербург скончалась императрица Екатерина I, покровительствовавшая Академии наук. Некоторые академики решили уехать из России. Скоро кафедры физики и математики стали свободны.

Заняв в Академии наук кафедру математики, Эйлер проявил необыкновенные способности. Однажды понадобились астрономические таблицы, для вычисления которых математики требовали несколько месяцев. Эйлер взялся вычислить их в течение трех дней и сдержал слово.

Эта напряженная работа стоила Эйлеру, однако, очень дорого: вследствие переутомления он заболел и ослеп на один глаз. По выздоровлении Эйлер продолжал усиленно работать.

В первый период пребывания в России Эйлер написал и издал в 1736 году свой труд «Механика в аналитическом изложении», ставший началом нового направления в развитии этой науки.

Работы, изданные Петербургской Академией наук, доставили Эйлеру большую известность. Прусский король Фридрих Великий письмом из военного лагеря пригласил его в 1741 году в Берлинскую Академию наук. Эйлер принял предложение и поехал в Берлин, где прожил двадцать пять лет.

В этот, второй период своей жизни Эйлер издал больше сотни ценных математических трудов и работ по механике. В 1766 году Эйлер по приглашению императрицы Екатерины II снова возвратился в Россию и оставался в Петербурге до конца жизни.

В первый же год по возвращении в Петербург Эйлер потерял и второй глаз. Ему остались доступны только крупные меловые знаки на черной доске. Но Эйлер не уменьшил масштаба своей научной деятельности. Он продолжал выпускать математические труды, работая до последнего дня жизни.

Эйлер отказался от трудных геометрических выводов Ньютона. Он изучал движение аналитически, выражая зависимость между временем и положением материальной точки уравнениями.

Эйлер утверждал, что «всякое тело, которое передвигается в другое место... проходит через все средние места и не может из начального места перейти сразу в конечное».

Это значит, что в течение чрезвычайно короткого промежутка времени и положение тела изменится очень мало. Поэтому к изучению движения тела можно применить исчисление бесконечно малых величин.

При геометрическом методе логическое рассуждение связано с проводимыми линиями и плоскостями, которые нужно начертить. Аналитический же метод заключается в операциях с математическими знаками, не связанными с наглядными представлениями. Он дает возможность легко производить сложные операции, недоступные для геометрического способа.

Введение Эйлером аналитического метода в механику лишило ее наглядности, которую давал геометрический метод Галилея, Гюйгенса и Ньютона, но зато аналитический метод способствовал быстрому развитию этой науки.

Законы вращения тел

Изучая обращение планет, можно было принимать их за материальные точки — так малы их размеры по сравнению с космическими расстояниями.

Но как движутся части машин? Какие усилия возникают в них при работе?

Части машин — не материальные точки, движущиеся под действием сил. В них возникают напряжения, и они действуют одна на другую. Чтобы рассчитывать машины, стало необходимым разработать механику твердого тела, едва затронутую в работах Гюйгенса и Ньютона.

Занявшись изучением вращения твердых тел, Эйлер должен был прокладывать новые пути в этой неизученной области.

В 1756 году Эйлер издал свой труд «Теория движения твердых тел», в котором установил важнейшие законы вращения твердого тела. Для этого ему понадобилось ввести в механику новые, ранее неизвестные понятия о «моментах»¹. Одно из них — момент инерции тела относительно оси вращения.

Если принять грузик нитяного маятника за материальную точку, то моментом инерции его относительно оси вращения будет произведение массы на квадрат длины нити. Момент инерции вращающегося тела есть сумма произведений масс его точек на квадраты расстояний от оси вращения.

Гюйгенс пользовался уже этой величиной при изучении

¹ Галилей применял термин «момент» в смысле силы.

колебаний физического маятника. Эйлер обобщил понятие о моменте инерции и применил его при выводе законов вращения всех тел.

Определение момента инерции тел даже правильной геометрической формы представляет собой сложную задачу. Ее решают, разбивая тела на бесконечно малые элементы, момент инерции которых легко определить. Суммируя моменты инерции всех элементов, определяют искомый момент инерции тела.

Например, чтобы найти момент инерции диска относительно перпендикулярной к нему оси, проходящей через его центр, диск разбивают на большое число концентрических колец. Момент инерции диска равен сумме моментов инерции этих колец.

Подобным же способом можно определить момент инерции шара относительно одного из диаметров. Для этого нужно разделить шар системой параллельных плоскостей, перпендикулярных к этому диаметру, на множество дисков. Момент инерции шара равен сумме моментов инерции дисков относительно диаметра, служащего осью вращения.

Эйлер обратил особенное внимание на вращение свободного тела, примером которого может служить вращение Земли и других планет. Найденные им законы для такого вращения аналогичны законам поступательного движения. Только вместо массы в них фигурирует момент инерции, а угловая скорость заменяет поступательную скорость.

В каждом свободном теле, как доказал Эйлер, есть три оси, около которых вращение тела может происходить неопределенно долгое время. Они носят название главных. Особенно замечательна одна из них, относительно которой момент инерции имеет наибольшую величину: вращение около нее очень устойчиво.

Вращение же около двух других осей неустойчиво: при малейшем нарушении положения оси вращения тело начинает непрерывно менять ее, вращаясь около мгновенных осей.

Неустойчивость вращения около осей, не совпадающих с главной осью, можно наблюдать в следующем опыте.

Пусть металлическое кольцо вращается около вертикальной оси. Внутри кольца находится вытянутое тело, могущее поворачиваться около горизонтальной оси, про-

ходящей через его центр тяжести. Тело участвует во вращении кольца.

Если вертикальная ось вращения не совпадает с главной осью тела, то оно начнет поворачиваться около горизонтальной оси. Это движение будет продолжаться до тех пор, пока главная ось тела не совпадет с осью вращения.

Момент инерции однородного шара одинаков относительно всех его диаметров. Поэтому шар может вращаться неопределенно долго около любого из них.

Но сжатый эллипсоид, форму которого имеет, например, Земля, не обладает таким свойством. У него наибольшую величину имеет момент инерции относительно короткой оси. Поэтому вращение только около этой оси имеет устойчивый характер.

Разработанная Эйлером теория объяснила множество явлений, наблюдаемых при вращении тел. Она получила широкое применение в технике при расчетах машин, а в астрономии — при изучении фигуры планет.

Вращение твердых тел

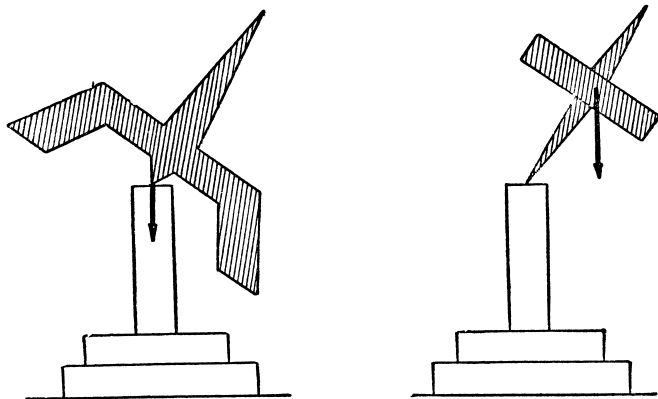
Законами вращения, выведенными теоретически Эйлером, объясняются замечательные свойства вращающихся тел, например волчка и гироскопа. Эйлер и Лагранж изучили два рода волчков.

Волчок Эйлера представляет собой подобие колокольчика с утолщенным нижним краем. Точка опоры его находится внутри и совмещается с центром тяжести волчка.

Другой вид волчка изучен французским математиком Жозефом Луи Лагранжем (1736—1813).

Жозеф Луи Лагранж был сыном бедных родителей и с ранних лет должен был сам добывать средства к жизни. В возрасте девятнадцати лет он уже преподавал математику в артиллерийском училище. В 1764 году Лагранж получил большую известность, представив в Парижскую Академию наук исследование либрации Луны¹, удостоенное специальной премии. Через два года после этого он был приглашен Берлинской Академией наук занять место Эйлера, уехавшего в Россию.

¹ Либрацией Луны называются небольшие колебания ее относительно Земли, вследствие чего наблюдению доступно более половины лунной поверхности.



Волчки, вращение которых исследовалось Эйлером (слева) и Лагранжем (справа).

В Берлине Лагранж прожил двадцать лет и издал много трудов по математике и механике. Там же он написал свою знаменитую «Аналитическую механику», но не нашел для нее издателя. Только по возвращении его в Париж эта замечательная работа была опубликована (в 1788 году).

Волчок Лагранжа отличался от изученного Эйлером тем, что у него центр тяжести лежал выше точки опоры. Приведенный в движение, волчок вращался бы равномерно (замедление вращения происходит вследствие трения в точке опоры и в окружающем воздухе). Его движение вполне аналогично равномерному поступательному движению по инерции.

Изучая вращение волчка, механики познакомились с замечательным проявлением инерции — сохранением направления оси вращения.

Волчок, служащий детской игрушкой, позволяет легко убедиться в этом. Приведенный во вращение развернувшейся пружиной, он кажется неподвижным.

Кажущееся на первый взгляд странным сохранение направления оси вращения объясняется очень просто: каждая частица вращающегося тела по инерции сохраняет направление своего движения; поэтому сохраняется положение плоскости, в которой она движется, а ось враще-

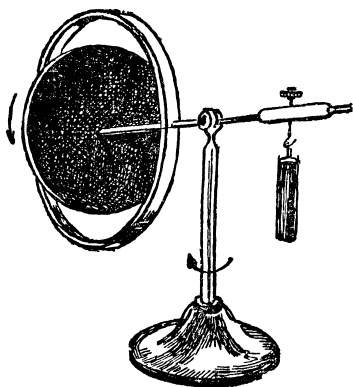
ния — воображаемый перпендикуляр к этой плоскости, восстановленный в центре кругового пути частицы.

Поскольку неизменно положение плоскости, в которой лежит путь частицы, постольку сохраняется и направление оси вращения. Когда же внешняя сила заставляет частицы тела изменить направление движения, то инерция частиц сопротивляется этой силе. Это сопротивление ощущается как сила, поворачивающая ось вращения.

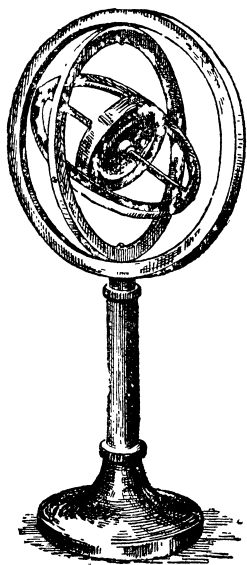
Если держать в руках концы оси вращающегося велосипедного колеса и поворачивать ось в горизонтальной плоскости, то частицы колеса сопротивляются изменению их движения и руки испытывают давление вертикальных сил. Наоборот, при поворачивании оси в вертикальной плоскости силы давления действуют в горизонтальном направлении. Рассматривая относительное направление сил, меняющих положение оси вращения и сопротивления этому изменению, можно вывести такое правило: когда на ось вращающегося волчка действует отклоняющая сила, то возникает движение оси в направлении, перпендикулярном этой силе.

Это явление удобно наблюдать на приборе особого устройства. Такой прибор состоит из горизонтального стержня, несущего вращающийся диск и груз. Диск и груз находятся по сторонам от точки опоры стержня, могущего поворачиваться как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости.

Груз уравнивает диск, но если передвинуть его дальше от опоры, то он станет поворачивать ось вращения диска в вертикальной плоскости. Вследствие этого стержень получит лишь легкое колебание вверх и вниз, но зато станет вращаться около точки опоры в горизонтальной плоскости, то есть перпендикулярно к направлению отклоняющей силы.



Рычажный гироскоп Фесселя. Вращающийся диск сохраняет положение оси, но под влиянием силы тяжести прибор получает вращение в горизонтальной плоскости.



Гирископ. Тяжелый вращающийся диск, установленный в кардановом подвесе, кольца которого могут вращаться около двух взаимно перпендикулярных осей.

Волчок, изученный Эйлером и Лагранжем, — не вполне свободное тело. Более свободным является гирископ Боненбергера.

Гирископ — массивный диск, вращающийся в обойме, подвешенной по способу Кардана. Он находится внутри кольца, могущего вращаться около оси, перпендикулярной к оси диска; кольцо, в свою очередь, помещено внутри другого кольца, также легко вращающегося около оси, перпендикулярной к оси вращения первого кольца.

Когда диск гирископа приведен в быстрое движение, то при любом изменении положения прибора ось вращения сохраняет свое направление в пространстве. Если она была направлена на какую-нибудь звезду, то будет следовать за суточным движением этой звезды.

Это свойство гирископа позволяет убедиться во вращении Земли. Движения Земли не оказывают влияния на положение оси гирископа в пространстве. Они увлекают центр тяжести гирископа, но не могут изменить направление вращения его оси.

Нужно, впрочем, заметить, что, направленный на звезду, гирископ не должен был бы изменять своего направления даже в том случае, если бы он не вращался. Однако сопротивление воздуха и незначительное трение частей прибора неизбежно будут отклонять его ось.

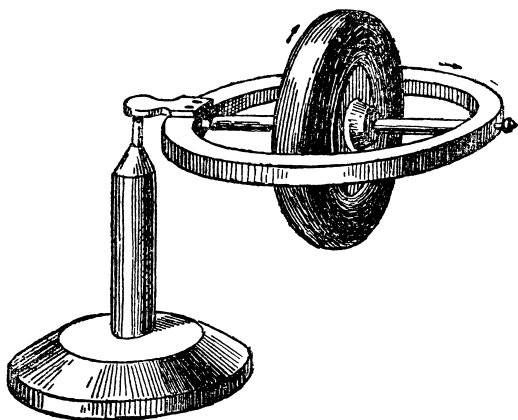
При быстром же вращении инерция движения сопротивляется не только этому ничтожному трению, но и довольно сильным толчкам.

Движение оси гирископа под действием отклоняющей силы происходит без инерции; оно длится только в течение времени, пока на ось действует отклоняющая сила. По выражению известного русского механика, академика

В. Л. Кирпичева, отклоняющая сила «держит полюс (конец оси вращения. — *Ф. Б.*) в узде, не позволяет ему ни разбежаться, ни отставать».

Знание свойств гироскопа имеет важное практическое значение. При всех расчетах, связанных с вращением тяжелых частей механизмов, нужно принимать во внимание возникающие вследствие него динамические давления.

Эти давления вызываются поворотом вращающегося тела около оси, перпендикулярной к плоскости, в которой лежат действующие на него силы.



Гироскоп. Вращающийся диск сохраняет горизонтальное положение оси в пространстве. Он свободно висит в воздухе, но кольцо движется в горизонтальной плоскости.

На современных судах двигателями служат обычно быстро вращающиеся турбины. Во время качки и при поворотах судна ось турбины отклоняется внешней силой. Это влечет за собой возникновение добавочного давления на подшипники, в которых вращается ось турбины.

Возникающими силами можно воспользоваться для уменьшения качки судна. Для этого в трюме судна нужно установить тяжелый гироскоп, чтобы при изменении его положения вследствие качки сопротивление оси гироскопа уменьшало раскачивание судна волнами.

Направление давлений в подшипниках оси гироскопа при боковой или килевой качке можно определить, поль-

зуюсь приведенным опытом с вращающимся велосипедным колесом.

В авиационных приборах также часто пользуются гироскопами, например для получения «искусственного горизонта»: установленная в горизонтальной плоскости ось гироскопа сохраняет это положение при всех движениях самолета, указывая на угол наклона его оси.

Теория вращения твердого тела получила также широкое применение для объяснения некоторых астрономических явлений, связанных с вращением Земли. Важнейшее из этих явлений — предварение равноденствий, или прецессия, замечено еще древними астрономами.

Вращение Земли

О вращении волчка мы судим, наблюдая его движение относительно окружающих предметов. Подобно этому можно изучать и вращение Земли по отношению к звездам, которые в этом случае считаются неподвижными.

Суточное движение звездного неба — кажущееся явление. Это отражение вращения самой Земли. Когда Земля повернется около своей оси на какой-либо угол, на такой же угол в обратном направлении изменится и направление, в котором мы видим каждую звезду.

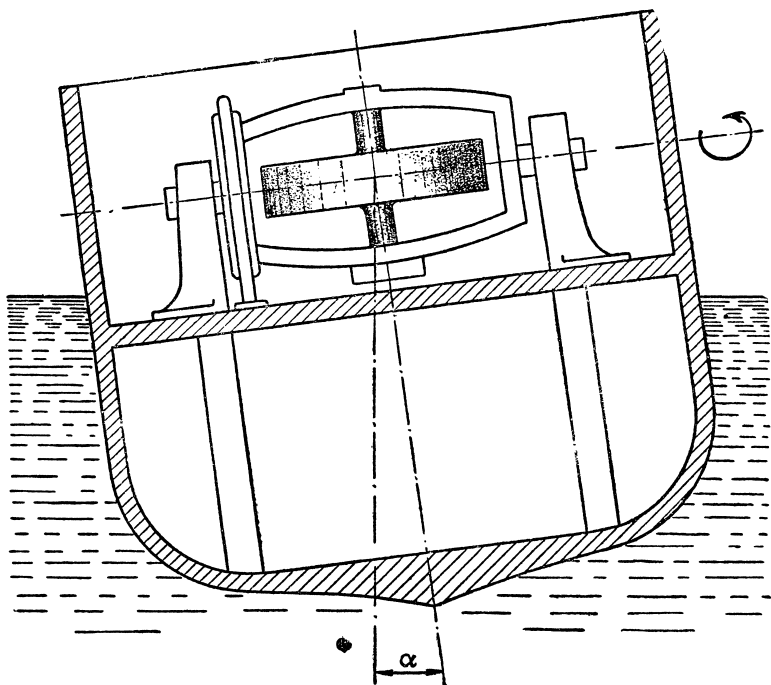
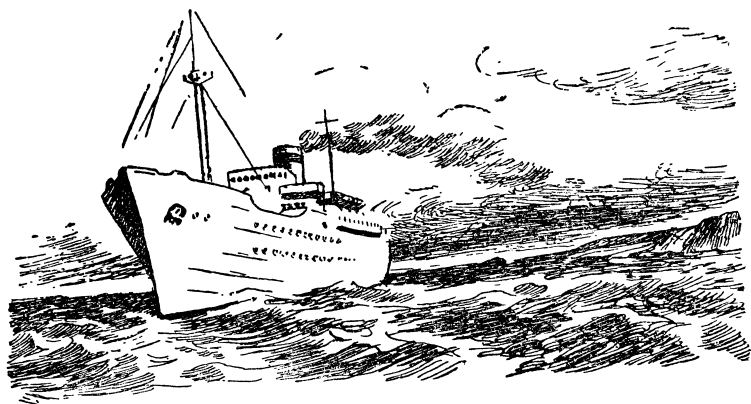
Оси кажущегося движения небесной сферы и действительного вращения Земли совпадают: ось мира, около которой вращается небесная сфера, есть воображаемое продолжение земной оси. Точки неба, в которых она как бы «упирается» в небесную сферу, — полюсы мира.

В Северном полушарии полюс мира находится в настоящее время вблизи Полярной звезды.

Если ось вращения Земли не меняла бы своего положения относительно звезд, то полюсы мира оставались бы всегда на одном месте.

Полюс мира ничем не отмечен на небесной сфере, но он вполне точно определяется астрономическими наблюдениями. Если бы полюс мира передвинулся, это значило бы, что изменилось и направление в пространстве земной оси.

Как доказали астрономические наблюдения, полюс мира не остается на одном месте. Он медленно движется среди звезд вокруг полюса эклиптики — так называется



При боковой качке на ось гироскопа действует пара сил, поворачивающих ее в плоскости, перпендикулярной продольной оси судна.
Сопротивление гироскопа ослабляет качку.

точка пересечения перпендикуляра, восстановленного в центре орбиты Земли, с небесной сферой¹.

Следовательно, земная ось движется по конической поверхности с вершиной конуса в центре Земли. Это движение вполне подобно тому, которое совершает ось вращающегося волчка, отклоняемая силой тяжести. Таким же образом объясняется и движение земной оси.

Земля немного сжата у полюсов и вытянута вдоль экватора. Разность полярного и экваториального радиусов равна 21,5 километра. Можно представить себе фигуру Земли как шар, опоясанный по экватору кольцом.

Притяжение Луны поворачивает экваториальное кольцо Земли в плоскость лунной орбиты. Поэтому оно отклоняет и ось вращения Земли. Вследствие гироскопического эффекта экваториальное кольцо получает движение, в результате которого ось вращения Земли описывает поверхность конуса.

Круговое движение земной оси усложняется еще обращением Луны вокруг Земли. Во время этого обращения Луна то приближается к плоскости экватора, то удаляется от нее до 5° небесного меридиана.

Когда Луна находится в плоскости земного экватора, зависящее от Луны движение земной оси прекращается. При удалении Луны на наибольшее расстояние от плоскости земного экватора земная ось движется по конусу с наибольшей скоростью.

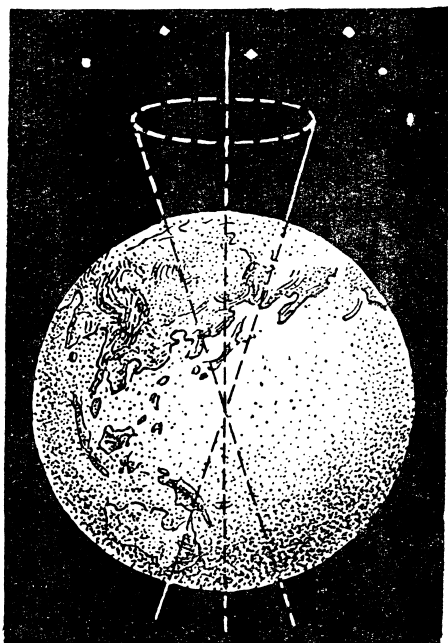
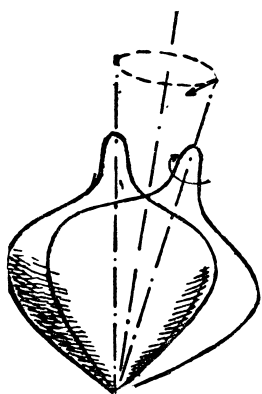
Подобным же образом влияет на положение земной оси вращение и притяжение Солнца. Но действие Солнца слабее действия Луны вследствие огромного расстояния, отделяющего от него Землю.

Если бы Земля вращалась около оси, относительно которой момент инерции ее имеет наибольшую величину, то вращение было бы очень устойчивым. Положение оси в теле Земли оставалось бы неизменным.

В действительности это не вполне верно.

Пересечения оси вращения с поверхностью Земли представляют собой ее географические полюсы. Если ось

¹ При движении земной оси по конусу меняется и положение плоскости экватора, причем точка весеннего равноденствия перемещается с востока на запад. Вследствие этого прямое восхождение всех звезд, отсчитываемое от этой точки, постоянно меняется на одну и ту же величину, что было замечено астрономами еще в древности.



Земная ось совершает движение по конусу с вершиной в центре Земли, подобно тому как это наблюдается у вращающегося волчка.

вращения не меняет положения в теле Земли, то не должно изменяться и положение на ней полюсов, а вместе с тем и географической широты каждого пункта земной поверхности.

Впервые Эйлер, исходя из своей теории вращения твердого тела, указал, что если земная ось вращения не вполне точно совпадает с главной осью, то она должна понемногу менять свое положение в Земле.

В те времена, однако, нельзя было установить, меняется ли географическая широта, например, обсерваторий. Только во второй половине XIX века измерения достигли такой точности, что можно было проверить справедливость предположения Эйлера.

Путем точнейших и тщательных измерений астрономы доказали, что географическая широта обсерваторий действительно периодически немного меняется: причем когда

у одного пункта она увеличивается, то у симметрично расположенного пункта по другую сторону полюса уменьшается. Эти движения полюсов невелики, и отклонение их от среднего положения не превышает 10 метров.

Перемещение полюсов доказывает, что ось вращения Земли меняет в ней свое положение. Значит, Земля вращается около оси, не вполне совпадающей с той, относительно которой момент инерции ее имеет наибольшую величину.

Вращение Земли оказывает влияние и на фигуру ее.

Если бы Земля не вращалась, то все ее частицы расположились бы вполне симметрично, и она имела бы форму шара. Вращение же заставило Землю сжаться у полюсов и вытянуться в плоскости экватора, приняв форму сжатого эллипсоида.

Впервые на сжатие Земли указал Ньютон. Он вывел теоретически и величину сжатия, то-есть отношение разности между экваториальным и полярным радиусами к большой полуоси.

Величина сжатия зависит от скорости вращения. Если бы угловая скорость вращения Земли увеличилась, то экваториальный радиус удлинился бы, а полярный укоротился. Проблемой зависимости фигуры Земли от угловой скорости ее вращения занимались многие математики и механики. Особенно важны исследования русского математика А. М. Ляпунова (1857—1918).

Сын русского астронома, А. М. Ляпунов окончил С.-Петербургский университет, получив золотую медаль за сочинение по математике. Он был оставлен при кафедре математики для подготовки к профессуре.

А. М. Ляпунов работал с увлечением, довольствуясь четырьмя-пятью часами сна. Он редко посещал театры и концерты, сосредоточив все свои интересы на математических исследованиях.

Диссертация А. М. Ляпунова, написанная для соискания первой ученой степени (магистра), была посвящена фигуре вращающегося жидкого космического тела. Последующие его работы также родственны этой теме.

А. М. Ляпунов доказал, что если бы скорость Земли все увеличивалась, то при достижении ею некоторой величины сжатый эллипсоид перестал бы быть фигурой «равновесия»; Земля начала бы сжиматься не только у полюсов, но и вдоль одного из диаметров экватора.

В настоящее время земные меридианы имеют эллиптическую форму, а экватор и параллели — круги. При большом же ускорении вращения экватор и параллели также превратились бы в эллипсы.

Тело, у которого и меридианы и параллели — эллипсы, называется трехосным эллипсоидом.

Исследование показало, что превращение фигуры Земли началось бы, когда большая ось ее превзошла бы по длине малую в 1,72 раза.

Трехосный эллипсоид оставался бы фигурой «равновесия» до определенной угловой скорости вращения Земли. При ускорении вращения отношение между его осями продолжало бы изменяться. Наконец, когда оси стали бы относиться как $1000 : 432 : 343$, то один конец эллипсоида начал бы вытягиваться, а другой притупляться.

Трехосный эллипсоид принял бы грушевидную форму. Как доказал А. М. Ляпунов, эта фигура неустойчива: от вытянутого конца должна бы отделиться часть тела, после чего тело опять приняло бы устойчивую форму эллипсоида. При замедлении вращения тела изменение его формы происходило бы в обратном порядке: укорачивался бы экваториальный диаметр и удлинялась бы ось вращения.

В настоящее время сжатие Земли равно $\frac{1}{298,3}$. Оно соответствует угловой скорости вращения, при которой Земля совершает один оборот около оси в течение 24 часов¹.

Но, как доказали астрономические наблюдения, скорость вращения Земли замедляется. В течение ста лет сутки становятся длиннее на 0,001 секунды. Это явление объясняется трением волны морского прилива,двигающейся в направлении, обратном вращению Земли.

Когда-то в далеком геологическом прошлом Земля вращалась быстрее, чем в наше время. Но трение волны прилива замедлило ее вращение.

Положим, что удлинение суток вследствие замедления приливным трением угловой скорости вращения Зем-

¹ Сжатие Земли есть отношение разности между ее полуосями к большой полуоси. В круглых числах оно равно $\frac{6378,3 - 6356,9}{6378,3} = \frac{1}{298,3}$.

ли происходило в течение тысячи шестисот миллионов лет. Как показывает расчет, сутки должны были удлиниться приблизительно на 4 часа.

Вместо 24 часов сутки длились только 20 часов, то-есть 0,8 нынешних суток. Значит, Земля вращалась в $\frac{1}{0,8} = 1,2$ раза быстрее. Поэтому сжатие ее было больше, чем теперь.

Сжатие увеличивается пропорционально квадрату скорости вращения. Теперь оно равно $\frac{1}{298,3}$. Значит, в те времена оно было в $1,2^2$ больше, то-есть равнялось $\frac{1}{210}$.

Через тысячу миллионов лет сутки удлинятся на 2,5 часа. Они будут равны 26,5 часа, то-есть в $\frac{26,5}{24} = 1,1$ раза длиннее. Угловая скорость вращения Земли уменьшится в $1,1^2$ раза. Вследствие этого полярный радиус удлинится, а экваториальный укоротится настолько, что сжатие Земли не превзойдет $\frac{1}{360}$.

Все эти расчеты сделаны в предположении, что вращается жидкая масса. Земля же — твердое тело. Однако под влиянием постоянных сил, как, например, тяготения частиц к центру масс, она проявляет свойства жидкого тела.

Поэтому при изменении скорости вращения фигура Земли будет изменяться. Но это изменение может происходить лишь очень медленно, вследствие чрезвычайной вязкости Земли.

Начало Даламбера

В первой половине XVIII века французский механик и математик Жан Лерон Даламбер (1717—1783) дал замечательный новый метод решения задач динамики.

Жизнь этого ученого может служить примером достижения больших успехов личным трудом.

Даламбер не знал своих родителей. Он был найден ребенком на паперти одной из церквей в Париже. Воспитанный в семье стекольщика, Даламбер занимался для заработка юридическими науками. Но, увлекшись математикой, он проявил в ней большие способности и быстро приобрел известность среди ученых.

В возрасте двадцати четырех лет Даламбер уже был выбран в члены Парижской Академии наук и получил крупную королевскую пенсию, позволившую ему, не заботясь о заработке, отдать все свое время научным исследованиям.

В расцвете славы Даламбер получил приглашение занять пост президента Берлинской Академии наук, а позднее — стать воспитателем сына императрицы Екатерины II. Но он отказался от обоих предложений и всю жизнь оставался на родине — во Франции, где был избран секретарем Парижской Академии наук.

Свой знаменитый трактат по динамике, составивший эпоху в развитии механики, Даламбер написал, когда ему было только двадцать шесть лет. В этом труде он изложил введенный им метод решения задач динамики, получивший название «начала Даламбера».

Чтобы понять, в чем заключается этот метод, нужно ввести понятие об инерционных (фиктивных) силах, возникающих при ускоренном движении.

Положим, что в каюте судна, плывущем равномерно и прямолинейно, наблюдатель изучает движение тел. Соответствующими опытами он установил бы законы, открытые Галилеем. С какой бы скоростью ни плыло судно, законы Галилея оправдывались бы в его каюте так же, как и на берегу.

Ни по каким механическим (и вообще физическим) явлениям пассажир каюты не мог бы узнать, движется ли он или находится в состоянии покоя.

Но если бы судно вдруг наскочило на подводный камень, то все предметы в каюте получили бы резкий толчок вперед. Это — проявление инерции движущихся тел: судно остановилось, а предметы в каюте, не связанные с ним, продолжают прежнее движение вперед.

Пассажир, не знающий о движении судна, имел бы право приписать внезапное движение предметов в каюте действию какой-то силы.

Подобное же явление наблюдалось бы при отплытии от пристани судна, равномерно ускоряющего ход.

Желая изучить возникающее в каюте движение тел, пассажир мог бы поставить в каюте игрушечный поезд на рельсах, направленных от кормы к носу судна. Он прикрепил бы один конец тонкого резинового шнура к поезду, а другой — к передней стенке каюты.

Судно ускоряло бы свой ход, а поезд откатывался бы от передней стенки каюты, растягивая резинку. Это продолжалось бы до тех пор, пока сила натяжения резинового шнура не сообщила бы ускорения судна поезду.

Наблюдатель, не знающий о движении судна, приписал бы это явление силе, действующей на поезд и растягивающей резиновый шнур.

Иная картина представилась бы наблюдателю, стоящему на берегу, если бы он мог видеть, что происходит в каюте.

Наблюдатель увидел бы, что движущееся судно растягивает резинку, прикрепленную к поезду. Поезд же по инерции остается неподвижным относительно берега.

Натяжение резинки сообщает поезду ускоренное движение. Поезд действует (по третьему закону Ньютона) через резинку на судно в обратную сторону.

Наблюдатель на берегу не увидел бы проявления в каюте никаких других сил. Сила, действующая на поезд в сторону, обратную движению судна, не существует. Это — проявление инерции поезда.

Такие кажущиеся, или фиктивные, силы, возникающие при ускоренном движении, называются инерционными.

Поезд в каюте движется (для наблюдателя с берега) под действием натяжения резины. Противодействие его через резиновый шнур приложено к судну. Если же рассматривать поезд с точки зрения наблюдателя в каюте, то он находится под действием напряжения резины и приложенной к поезду силы, уравновешивающих друг друга. Эта сила равна по величине и направлению противодействию, оказываемому телом по третьему закону Ньютона.

Изучая движения тела, нужно найти способ составить уравнение, которое связывает действующие на него силы с пройденным расстоянием, скоростью или ускорением. Когда такое уравнение составлено, то исследование сводится к решению этого уравнения, то-есть к чисто математической задаче.

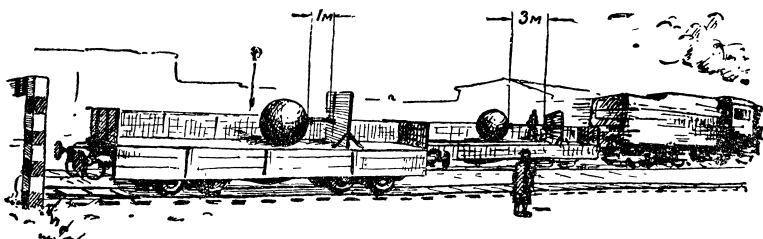
Наблюдатель с берега видит, что поезд в каюте ускоренно движущегося судна получает ускорение относительно берега вследствие напряжения резинового шнура, который тянет его в направлении движения судна.

По второму закону Ньютона сила, действующая на поезд, равна его массе, умноженной на ускорение. Это

уравнение определяет собой движение поезда относительно берега: зная массу поезда и действующую на него силу, можно вычислить ускорение, с которым движется поезд, расстояние, которое он пройдет за определенное время, и скорость в каждый данный момент.

С точки зрения пассажира каюты, поезд находится под действием напряжения резинового шнура и какой-то силы, уравнивающей это напряжение, вследствие чего он остается в покое относительно судна.

Как было показано, сила, уравнивающая напряжение резины, — фиктивная инерционная сила, равная



Пассажиру кажется, что шар, когда вагон трогается с места, покатился. В действительности же он остался на месте (относительно наблюдателя, стоящего на полотне железной дороги).

противодействию, оказываемому поездом и приложенным к резиновому шнуру.

Следовательно, условие равновесия поезда относительно судна выражается равенством нулю суммы этих двух взаимно уравнивающих сил¹.

В этом и заключается начало Даламбера, которое можно сформулировать так: в каждый данный момент сила, приложенная к материальной точке, уравнивается силой инерции материальной точки, понимая под «силой инерции» фиктивную силу, возникающую при ускоренном движении.

¹ Сила, приложенная к телу, равна массе, умноженной на сообщаемое телу ускорение: $f = ma$. Противодействие тела выражается величиной $(-ma)$. Если считать его приложенным к самому телу, то можем написать уравнение $f + (-ma) = 0$, или $f - ma = 0$, рассматривая его как условие «равновесия» движущегося тела.

Фиктивные инерционные силы приходится вводить в расчеты, когда мы имеем дело с ускоренным движением. К решению возникающих при этом вопросов с успехом применяется начало Даламбера.

Представим себе, что наблюдатель в лифте подвесил к пружинным весам некоторый груз.

Пока лифт находится в покое, груз растягивает своей тяжестью пружину весов. Но как только лифт начнет ускоренно двигаться вниз, груз как бы теряет часть веса. Если бы лифт стал двигаться с ускорением свободного падения, то груз перестал бы вовсе действовать на пружину весов.

Наблюдатель в лифте приписал бы потерю веса действию на груз какой-то силы, направленной вверх, — это и есть фиктивная инерционная сила, возникающая в ускоренно опускающемся лифте.

Так объясняется явление, на которое указывал еще Галилей в своих «Беседах о двух новых науках»: если положить один камень на другой и дать им возможность падать, то верхний камень не будет давить на нижний.

Прилагая к движению падающего камня начало Даламбера, можно сказать, что на камень действуют две силы: тяжесть и равная ей, но по направлению обратная, фиктивная сила инерции, взаимно уравнивающиеся. Поэтому верхний камень и не давит на нижний.

Применением начала Даламбера облегчается решение задач динамики.

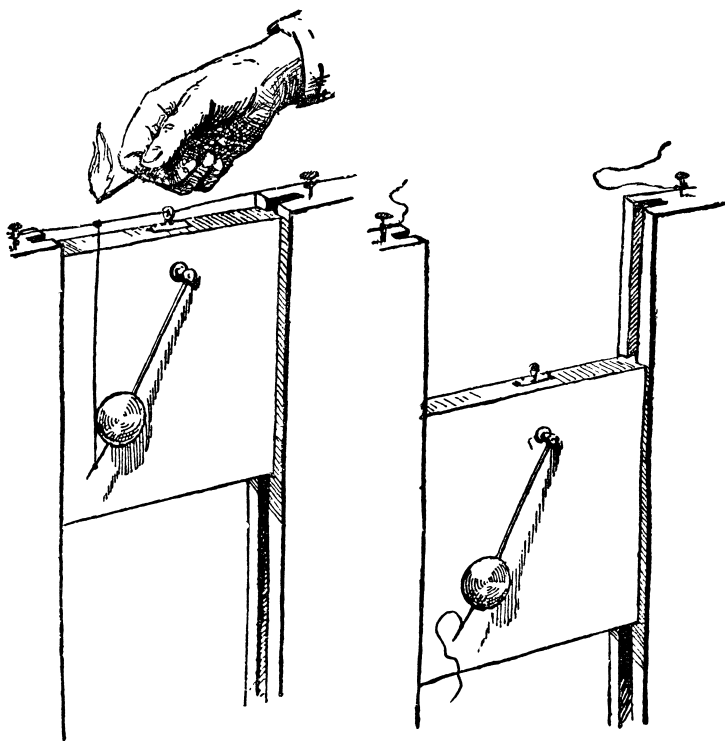
Положим, например, что на четырехугольной доске, могущей свободно падать вниз ребром между вертикальными рейками, подвешен маятник.

Отклоним маятник в сторону и в этот момент дадим возможность доске падать.

Что произойдет с маятником? Решить этот вопрос — значит найти, как будет вести себя маятник относительно доски. Ответ дает применение начала Даламбера.

На маятник действует сила тяжести. Она направлена вниз. Фиктивная сила инерции маятника равна ей, но направлена в противоположную сторону. Сумма этих двух сил равна нулю. Поэтому маятник останется во все время падения отклоненным от вертикали на одинаковый угол, как будто он потерял вес.

Понятием о фиктивных инерционных силах пользуют-



Положение отклоненного в сторону маятника на падающей доске в течение падения остается неизменным.

ся в технике, например, при расчетах, связанных с испытанием прочности материалов.

Брусек металла прикрепляется одним концом к ползуну машины, совершающему попеременное движение вверх-вниз от шатуна и кривошипа. К другому концу бруска подвешивается груз.

Вал машины быстро вращается. Поэтому брусок получает ускорение то вверх, то вниз. При этом каждый раз брусок испытывает то сжатие, то растяжение, которые можно представить как действие на него фиктивных инерционных сил.

Такое испытание позволяет определить сопротивление бруска попеременной нагрузке, наиболее разрушительной для частей машин.

„Инерционные“ силы на вращающейся Земле

Земля — вращающееся тело. Вращение — ускоренное движение. Поэтому при изучении движений тел на земной поверхности пользуются понятием о фиктивных инерционных силах, облегчая таким способом решение задач.

Одна из таких фиктивных сил, которую вводят при изучении силы тяжести, — «центробежная» сила. Она отсутствует на полюсах и достигает наибольшей величины на экваторе, где составляет $\frac{1}{289}$ силы тяжести. В других точках земной поверхности «центробежная» сила имеет среднее значение и направлена перпендикулярно к земной оси в противоположную сторону от нее.

Равнодействующая тяготения, направленного к центру Земли, и «центробежной» силы есть сила тяжести, которая определяет направление физического отвеса, перпендикулярного к поверхности воды. Сила тяжести в каждой точке земной поверхности может быть определена по известной формуле¹.

Когда тело движется по земной поверхности в каком бы то ни было направлении, то вследствие свойственной ему инерции оно испытывает отклонение. Это отклонение можно для удобства рассуждения приписать действию фиктивной «отклоняющей» силы.

Мы не будем входить в рассмотрение того, почему возникает это отклонение при любом направлении движения тела. Рассмотрим лишь простейший случай, когда тело движется вдоль меридиана от полюса к экватору или в обратном направлении.

При движении от полюса к экватору тело, сохраняя по инерции линейную скорость, сообщаемую ему вращением Земли, переходит в зону, где линейная скорость вращения больше. Поэтому оно отстает от земной поверхности и уклоняется к западу, то-есть в Северном полушарии вправо, а в Южном — влево.

При движении в обратном направлении тело сохраняет большую скорость и уклоняется к востоку, то-есть также в Северном полушарии вправо, а в Южном — влево.

¹ Сила тяжести g определяется по формуле $g = g_0 + (g_1 - g_0) \sin^2 \varphi$, где g_0 — ускорение на экваторе, g_1 — ускорение на полюсе, φ — географическая широта.

Можно доказать, что при любом движении по земной поверхности тело отклоняется в Северном полушарии вправо, а в Южном — влево.

В результате отклонения частиц воды в реках в Северном полушарии происходит подмывание правого берега рек и более быстрое изнашивание правого рельса железнодорожных путей. В Южном полушарии то же происходит с левым берегом рек и левым рельсом.

На этом же отклонении движений вращением Земли основан и знаменитый опыт с маятником Фуко.

Колебания маятника в Северном полушарии отклоняются вправо (если смотреть по направлению колебания). Поэтому плоскость колебаний вращается относительно Земли с востока на запад (по движению часовой стрелки).

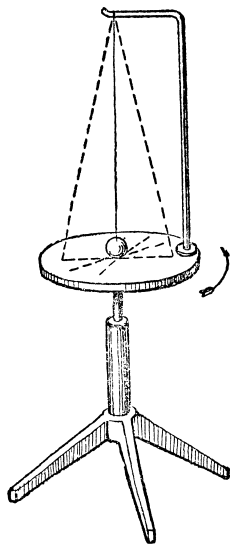
Наибольший эффект такого опыта можно было бы наблюдать на одном из полюсов Земли, так как там ось вращения ее проходила бы через точку подвеса маятника, плоскость колебаний которого вследствие отклоняющего действия строго сохраняла бы положение в пространстве.

Заметив какую-либо звезду, на которую направлены его колебания, мы увидели бы, что в течение суток маятник колебался бы, не меняя направления и точно следуя за видимым суточным движением звезды. Плоскость его колебаний на полюсе поворачивалась бы на $\frac{360}{24} = 15^\circ$ в час.

Таково проявление инерции на вращающейся Земле.

Если бы скорость вращения Земли резко уменьшилась, то проявление инерции имело бы катастрофические последствия.

Воды Океана, сохраняя свое движение, пронеслись бы ужасной волной с запада на восток. Кроме того, они переместились бы от экватора в направлении к полюсам, затопляя материки.



Опыт, доказывающий сохранение маятником плоскости колебаний.

Однако в действительности это явление не угрожает человечеству. Нет причин к резкому замедлению или ускорению угловой скорости вращения Земли.

Возникновение понятия о работе

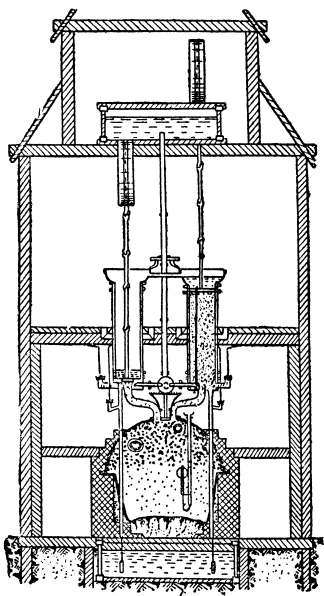
XVIII век ознаменовался развитием производства и техники.

В Европе появилось большое количество ранее мало известных товаров: хлопка и других колониальных продуктов. Цеховое ручное производство не могло справиться с задачами, возникшими в промышленности. В Англии, где быстро развивалось капиталистическое производство, изобретались машины — двигатели и станки.

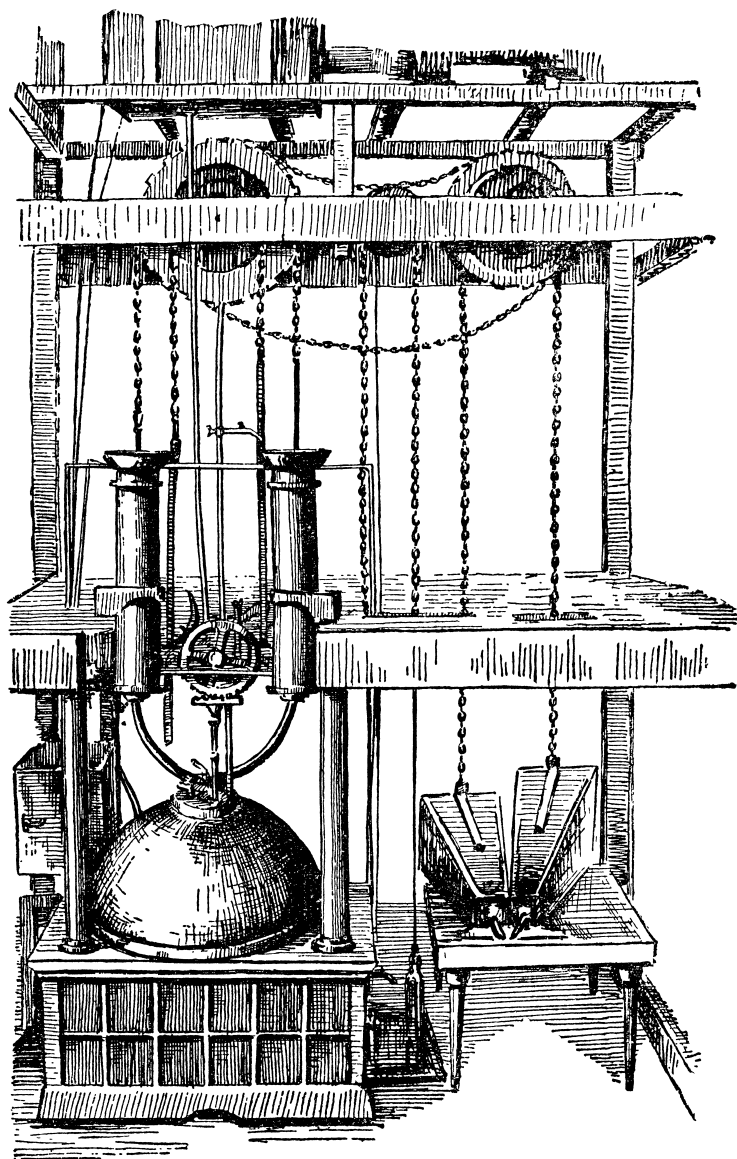
В самом начале XVIII века была изобретена первая паровая машина Ньюкомена. Она получила широкое распространение на английских угольных рудниках. Проект более совершенной паровой машины был составлен в 1763 году русским механиком И. И. Ползуновым (1728—1766), который и построил ее в 1765 году на одном из Кольяново-Воскресенских заводов. Она была вполне пригодна для обслуживания до двенадцати заводских печей.

В условиях того времени в России изобретение И. И. Ползунова осталось неизвестным. Но вскоре довольно совершенная паровая машина была изобретена англичанином Джемсом Уаттом (1736—1819). Эта машина была установлена на многих рудниках, фабриках и заводах в Англии и Франции.

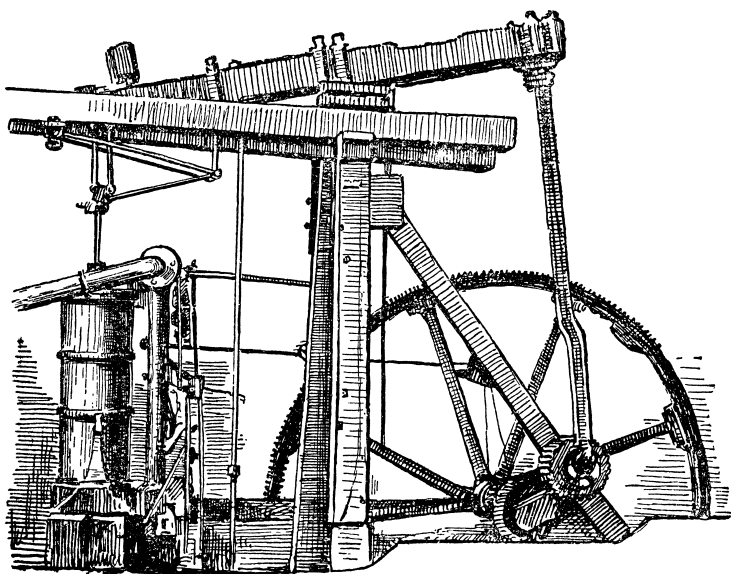
Одновременно строились и рабочие машины. В 30-х годах XVIII века появились



Паровая машина И. И. Ползунова в разрезе.



Двухцилиндровая паровая машина непрерывного действия
И. И. Ползунова.



Паровая машина Уатта.

в Англии ткацкие и прядильные станки. После изобретения Джемсом Уаттом паровой машины станки приводились в движение силой пара.

В технике возникла потребность измерения мощности и работы машин-двигателей. До того времени в механике не было ясного определения работы. Только в конце первой четверти XIX века французский инженер и математик Жан Понселе (1788—1867) ввел в науку ясное понятие о работе силы на определенном пути: под работой он подразумевал произведение силы на расстояние, пройденное точкой ее приложения без ускорения.

Когда сила действует на свободное тело, то сообщает ему ускоренное движение. Если же тело под действием силы движется без ускорения, значит, энергия расходуется на преодоление трения и других препятствий к движению тела.

В этом и заключается работа силы.

Положим, что груз поднимается при помощи подвижного блока. Сила, действующая на груз, вдвое меньше его,

но зато точка приложения ее проходит вдвое большее расстояние.

Следовательно, произведения груза и силы на пройденные ими расстояния равны, то-есть совершенная ими работа одинакова. Введение понятия о работе позволило вложить новый смысл в начало возможных перемещений и расширить область его применения.

Произведение силы на возможное перемещение есть возможная работа. Значит, для равновесия сил, приложенных к рычагу, блоку и другим простым машинам, нужно, чтобы общая возможная работа равнялась нулю.

Стевин и Галилей прилагали этот принцип только к простым машинам. Механики XVIII века распространили



Ворот с зубчатым приводом — лебедка.

его и на сложные механизмы (считая, что движение их частей происходит без трения).

Предположим, что сила приложена к рукоятке на оси небольшой шестерни, сцепляющейся с большим зубчатым колесом. На валу этого колеса подвешен груз.

Повернем чуть-чуть рукоятку. Путь, пройденный точкой приложения силы, равен длине рукоятки, помноженной на угол поворота (в радианах)¹.

Большое колесо (и вместе с ним вал) повернется на угол, меньший во столько раз, во сколько радиус шестерни меньше радиуса большого зубчатого колеса. А груз поднимется на расстояние, во столько раз меньшее возможного перемещения зубца большого колеса, во сколько радиус этого последнего больше радиуса вала.

Вычислив работу, совершенную каждой частью этого механизма, найдем, что если сила уравнивает груз, то общая работа всех частей механизма при бесконечно малом перемещении будет равна нулю.

Обобщение начала возможных перемещений на все случаи равновесия материальных точек, движение которых определяется связями, было сделано Лагранжем. Оно дало общий метод решения задач статики.

Сохранение кинетической энергии

Идея о неуничтожаемости движения возникла еще в древности. Она была тесно связана с философским представлением, что в природе нет ничего, кроме движущихся атомов.

Вот как писал об этом поэт-философ Лукреций Кар в своей поэме «О природе вещей»:

Вся совокупность материи не была сжата плотнее
В целом своем никогда, как и не была более редкой,
Так как ничто не приходит в нее и ничто в ней не гибнет.
А потому и движение, в котором первичные тельца
Вечно бывают, с начала веков оставалось все тем же.

¹ При таких расчетах подразумевают бесконечно малые перемещения. В противном случае вывод может оказаться ошибочным. Рад и а н — единица измерения углов, употребляемая в теоретических расчетах; представляет собой угол, у которого дуга равна радиусу окружности; в градусной мере равен $57^{\circ}17'44,8''$.

Это учение, однако, не было связано с измерением количества движения.

В XVII веке возникла динамика, изучавшая количественные законы движения. Ученые уже не довольствовались качественными гипотезами. Они измеряли скорости и количество движения.

Так была подготовлена почва для открытия закона сохранения материи и энергии, сформулированного великим русским ученым М. В. Ломоносовым (1711—1765).

Сын крестьянина-помора, М. В. Ломоносов ушел из деревни Денисовки (близ города Холмогоры) в Москву, чтобы учиться. Не получая ни от кого поддержки, он упорно работал и был одним из лучших студентов по успехам.

В 1736 году молодой Ломоносов вместе с двумя другими студентами был послан для изучения специальных наук в Германию. Там он слушал лекции физика Вольфа.

По возвращении в Россию М. В. Ломоносов был зачислен адъюнктом в Петербургскую Академию наук. В течение первых десяти лет пребывания в Академии наук М. В. Ломоносов написал ряд исследовательских работ. В «Рассуждении о природе тепла и холода» он утверждал, что теплота есть движение корпускул. В письме к Л. Эйлеру М. В. Ломоносов высказал замечательную идею о сохранении в природе постоянного количества движения и материи.

«Все изменения, случающиеся в природе, — писал Ломоносов, — происходят так, что если что-либо прибавится к чему-либо, то столько же отнимется от чего-то другого. Так, сколько к какому-нибудь телу присоединяется материи, столько же отнимается от другого... Так как этот закон природы всеобщ, то он простирается даже и в правила движения, и тело, побуждающее своим толчком другое к движению, столько же теряет своего движения, сколько сообщает другому, движимому им».

Ломоносов сформулировал закон сохранения кинетической энергии (движения) в общем виде. Для некоторых частных случаев этот закон высказывался и другими учеными. Например, Гюйгенс установил, что при соударении вполне упругих тел сумма произведений их масс на квадраты скоростей остается постоянной.

Закон сохранения энергии подтверждается многими наблюдениями. Расширение горячих газов в стволе ружья

приводит в движение пулю, преодолевая сравнительно небольшое трение и сопротивление воздуха. За вычетом части работы, израсходованной на преодоление этих сопротивлений, вся остальная работа расширяющихся газов превращается в кинетическую энергию летящей пули¹.

Кинетическая энергия пули, в свою очередь, может совершить такую же работу. Если пуля встретит баллистический маятник, то отклонит его. Расчет показывает, что для отклонения маятника произведена такая же работа, какая была нужна для сообщения пуле ее кинетической энергии.

Оставалось только неясным, что происходит с кинетической энергией, как бы «исчезающей» при столкновении неупругих тел или при трении движущегося тела. Чтобы разгадать причину этого явления, нужно было знать, что вещество состоит из молекул (корпускул), находящихся в постоянном колебательном движении.

Высказанных М. В. Ломоносовым идей было достаточно, чтобы прийти к мысли о переходе энергии при столкновении неупругих тел или при трении в колебания корпускул, то-есть в теплоту. Нужно было только подтвердить эту мысль на опыте.

Такое наблюдение и было сделано в самом конце XVIII века.

В 1798 году английский физик Бенжамин Томпсон (1753—1814), получивший титул графа Румфорда, сообщил Лондонскому Королевскому обществу о сделанном им наблюдении превращения механического движения в теплоту. Присутствуя при сверлении стальных стволов пушек, Румфорд видел, что сверла, ствол пушки и стальные стружки сильно нагревались.

Так как при этом не происходило никаких химических процессов, то образование теплоты могло быть приписано только переходу вращательного движения сверла в тепловые колебания молекул металла.

¹ Действуя на тело массы m , сила f сообщает ему ускорение a . В течение времени t тело приобретет скорость $v = at$ и пройдет расстояние $s = \frac{at^2}{2}$. Величина силы по второму закону Ньютона $f = ma$. Помножив силу f на пройденное телом расстояние, найдем работу силы $fs = m \frac{a^2 t^2}{2}$, или $fs = \frac{mv^2}{2}$, то-есть приобретенная кинетическая энергия равна работе силы на том же пути.

Позднее подобные опыты были сделаны и другими физиками.

Например, при трении друг о друга двух гладких кусков льда наблюдалось их таяние. Энергично мешая лопатками воду, удалось повысить ее температуру.

Так было доказано превращение движения в теплоту. После этого стало очевидным, что кинетическая энергия не исчезает. Например, при соударении неупругих тел часть кинетической энергии переходит в теплоту и повышает температуру соударяющихся тел.

Английский физик Джеймс Прескотт Джоуль (1818—1889) своими опытами определил механический эквивалент теплоты, то-есть количество ее, соответствующее определенному количеству механической энергии.

Заставляя воду протекать через узкие трубки, Джоуль установил, что механическая работа, необходимая для поднятия 1 килограмма на высоту 424 метров, превращаясь в теплоту, нагревает 1 килограмм воды на 1 градус Цельсия.

Позднее было доказано, что сохранение кинетической энергии есть проявление общего закона сохранения, применимого ко всем видам энергии, существующим в природе.

Энергия не создается и не уничтожается, а только превращается из одного вида в другой.

Этим свойством энергии объясняется и невозможность так называемого вечного движения, то-есть создания машины, которая производила бы работу без затраты энергии.

Не только в средние века, но даже в новое время множество изобретателей трудились над созданием проектов такой машины. Большая часть их добросовестно заблуждалась, веря в возможность осуществления вечного движения.

Еще в XIII веке начались подобные попытки. Обычно такой двигатель представлял собой колесо, вращающееся на горизонтальной оси. Внутри колеса перекачивались тяжелые шары, причем они должны были на одной стороне всегда находиться дальше от оси вращения, чем на другой.

В других проектах насос должен был накачивать воду в верхние черпаки водяного колеса, которое приводит его в движение.

Совершенно очевидно, что для поднятия шаров или воды на определенную высоту нужно произвести ту же работу, которую они могут совершить опускаясь. Поэтому никакая из этих машин не может прийти в движение сама по себе. Если же привести такое колесо во вращение, то оно может вращаться, быстро замедляя свое движение, пока сообщенная ему кинетическая энергия не израсходуется на преодоление трения (причем вся эта энергия перейдет в теплоту). После этого машина остановится.

Нужно отметить, что шары или перекачка воды в машине «вечного движения» не удлинят, а укоротят время вращения колеса, так как увеличат трение. Если заставить вращаться одновременно с той же силой просто приподнятое велосипедное колесо, то его вращение будет продолжаться дольше, потому что трение оси в шарикоподшипниках очень невелико.

Ученые издавна указывали на абсурдность идей вечного движения.

Еще Леонардо да Винчи предупреждал изобретателей, что идея вечного двигателя неосуществима. Позднее Стевин обосновал свой вывод закона наклонной плоскости, исходя из невозможности вечного движения. К этому доказательству прибегал и Галилей.

Но изобретатели не были физиками-мыслителями. Они продолжали подавать множество проектов в академии и другие учреждения.

Наконец в XVII веке Парижская Академия наук поручила академику Лагиру рассмотреть вопрос о вечном движении.

Лагир дал в 1678 году простое и ясное доказательство неосуществимости создания машины, не только производящей работу, но даже вообще могущей находиться в вечном движении без затраты энергии.

Несмотря на это, изобретатели вечного движения продолжали подавать свои фантастические проекты. Тогда в 1755 году Парижская Академия наук прекратила прием проектов вечного двигателя.

Как сообщал еще недавно академик В. Л. Кирпичев, и в наше время нет недостатка в изобретателях вечного двигателя.

«Это почти всегда, — писал В. Л. Кирпичев, — лица очень почтенные, добросовестно преданные идее, но увлеченные ею так сильно, что они абсолютно глухи к дово-

дам рассудка. На них не действуют не только словесные, логические доказательства, но даже такое сильное фактическое доказательство, которое им представляют своей полной инертностью продукты их изобретательности, изготовленные их собственными руками».

Только ознакомление широких масс с законом сохранения энергии и с историей механики может прекратить бесполезную затрату труда на изобретение машины вечного движения.

Развитие механики в России

В эпоху Петра I в России строились суда, сооружались заводы, закладывались рудники... Русские строители, техники и моряки в своих расчетах почувствовали необходимость в знании механики.

Уже «Арифметика» Магницкого (1669—1739), вышедшая в 1703 году, содержала некоторые сведения по механике. В этом учебнике были даны понятия о равновесии, движении, скорости и силе.

В Морской академии, в Инженерной и Артиллерийской школах — учебных заведениях, основанных в 1712—1715 годах, — преподавались статика и теория простых машин.

Промышленность, военное дело, мореплавание и строительство развивались так быстро, что скоро этих познаний стало недостаточно. Русские техники были вынуждены путем догадок решать возникавшие перед ними задачи.

Для удовлетворения потребности в теоретических руководствах уже в первой половине XVIII века начались составление книг и переводы с западноевропейских языков.

В 1722 году вышла «Наука статическая, или механика» Г. Г. Скорнякова-Писарева, изучавшего физико-математические науки в Германии и Италии. Это было первое сочинение русского автора по механике. В нем излагались законы равновесия тел, находящихся под действием различно направленных сил, в применении к теории простых машин.

С основанием в 1725 году Академии наук в Петербурге в ней начали работать известнейшие механики того времени: Даниил Бернулли, а позднее Леонард Эйлер.

Хотя многие западноевропейские ученые того времени считали механику отраслью математики, М. В. Ломоносов постоянно указывал на роль эксперимента в физике и механике.

«Ныне ученые люди, — писал этот великий мыслитель, — а особливо испытатели натуральных вещей, мало взирают на родившиеся в одной голове вымыслы и пустые речи, но больше утверждают на достоверном искусстве (опыте. — *Ф. Б.*). Главнейшая часть натуральной физики ныне уже только на оном одном свое основание имеет. Мысленные рассуждения произведены бывают из надежных и много раз повторенных опытов».

Русские ученые середины XVIII века интересовались исключительно приложением механики к строительству зданий, морских судов, кораблевождению и другим задачам практики.

Одним из первых русских механиков XVIII века был ученик Эйлера — С. К. Котельников (1723—1806). Он вышел из народа и окончил основанную при Петре I школу для бедных людей. По окончании этой школы Котельников перешел в гимназию, а позднее — в университет при Академии наук. Там он слушал лекции М. В. Ломоносова. В 1751 году Котельников был послан в Берлин к Л. Эйлеру.

Уже к 1753 году Котельников овладел таким запасом знаний, что Эйлер рекомендовал его для занятия кафедры механики в Петербургской Академии наук.

С. К. Котельников читал лекции по механике и в 1774 году издал сочинение под заглавием «Книга, содержащая в себе учение о равновесии и движении тел».

Деятельность М. В. Ломоносова, Л. Эйлера и С. К. Котельникова сыграла решающую роль в развитии механики в России. Уровень знаний в России в конце XVIII века поднялся на ту же высоту, как и в Западной Европе.

Кроме С. К. Котельникова, можно было бы назвать еще несколько имен русских профессоров механики XVIII века. Все они находились под сильным влиянием работ Л. Эйлера и идей М. В. Ломоносова.

М. В. Ломоносов и Л. Эйлер в воззрениях на силу были сторонниками учения Декарта. Понятие о силе, действующей на расстоянии, казалось им возвратом к «скрытым качествам» аристотелианцев. Сила, как думали эти

ученые, есть проявление движения частиц материи, действующих непосредственным ударом или давлением.

«...Причиной тех сил, вследствие которых изменяется состояние тел, — писал Эйлер, — следует считать не только инерцию, но сочетание последней с непроницаемостью».

М. В. Ломоносов указывал, что и сам Ньютон не считал тяготение свойством тел, что только его последователи приписали материи способность притяжения на расстоянии.

Не отрицая вместе с Ньютоном, что движения небесных тел происходят так, как будто они взаимно притягивают друг друга, Эйлер и другие механики пользовались при математических расчетах принципом всемирного тяготения. Но они были убеждены, что тяготение — кажущееся явление, которое должно найти механическое объяснение в ударе или давлении частиц материи.

Эти воззрения господствовали в русской механике до начала 90-х годов XVIII века. Но успехи небесной механики, пользовавшейся принципом всемирного тяготения, заставили забыть о загадочности этого явления.

К тому времени интерес ученых к вопросу о природе тяготения уже ослабел. Ученые довольствовались тем, что расчеты, основанные на принципе всемирного тяготения, оправдываются в действительности.

В XIX веке в развитии механики в России наметилось два течения.

Одни из русских ученых интересовались механикой как приложением математики. Другие разрешали теоретические проблемы техники.

Дальнейшее развитие аналитической механики

Конец XVIII и начало XIX века ознаменовались быстрым развитием техники. Началась постройка железных дорог. Сооружались пароходы. Возрастал интерес к механике.

В России один за другим открывались университеты — в Казани, Петербурге, Харькове. Они стали выпускать русских математиков и механиков.

Гениальным математиком и механиком первой половины XIX века был М. В. Остроградский (1801—1862).

Сын небогатого помещика, М. В. Остроградский, не окончив гимназии, хотел стать офицером. Он мечтал о блестящем гвардейском мундире и не поверил бы, что делается ученым.

Родители повезли его в Петербург, чтобы поместить в полк. Но по дороге, под влиянием советов одного родственника, переменили решение: юношу начали готовить в высшее учебное заведение.

В 1817 году М. В. Остроградский поступил в Харьковский университет. Даже став студентом, он не сразу понял, в чем его призвание. Только в конце второго года учебы М. В. Остроградский почувствовал большое влечение к математике и проявил замечательные способности в этой науке. Он не только на лету усваивал труднейшие теоремы, но и делал самостоятельные математические выводы.

Успешно изучая математику и точные науки, М. В. Остроградский не посещал лекций богословия и философии. Поэтому, по настоянию реакционной части педагогического совета, ему не был выдан университетский диплом.

Тогда в 1822 году М. В. Остроградский уехал в Париж. Там он слушал лекции знаменитейших математиков. Через четыре года он сам уже написал научную работу — исследование волнового движения жидкости в цилиндрическом бассейне.

Эта работа получила лестные отзывы французских ученых. Имя М. В. Остроградского скоро приобрело в мире математиков известность. Когда через год он возвратился в Россию, то стал центром внимания петербургского математического кружка. В 1830 году М. В. Остроградский был избран в экстраординарные, а через год — в ординарные академики Российской Академии наук. М. В. Остроградский читал лекции по математике и механике в Педагогическом институте, в Морском кадетском корпусе, в Михайловской артиллерийской академии, но не оставлял исследовательской деятельности. Он опубликовал десятки замечательных работ по математике и механике. Важнейшие из них были посвящены обобщению принципов механики, и в числе их — началу возможных перемещений.

Как уже было сказано ранее, начало возможных перемещений возникло при изучении действия машин. Оно

дает возможность составить уравнение равновесия системы тел, соединенных материальными связями. Пользуясь началом возможных перемещений, можно рассчитать любой механизм, то-есть определить размеры всех его частей.

Однако до Остроградского начало возможных перемещений выражалось в такой форме, что могло применяться к расчету только системы тел с удерживающими или двусторонними связями.

Такие связи, допуская движение части механизма в одну сторону, позволяют ему двигаться и в противоположную и, наоборот, не допуская движения в одну сторону, не допускают его и в другую.

Обыкновенный подшипник представляет собой пример двусторонней, или удерживающей, связи: он не «допускает» (как писали в курсах механики) ни опускания, ни поднятия вращающейся в нем шейки вала.

Но если снять крышку подшипника, то связь становится односторонней, или неудерживающей. Такие подшипники применяются для тяжелых водяных колес и ветряков. Подшипник без крышки не препятствует поднятию вала, удерживаемого на месте только тяжестью колеса.

Лагранж и все механики XVIII века считали, что начало возможных перемещений приложимо только к двусторонним связям. Они не применили бы это условие равновесия к водяному колесу с подшипниками без крышек.

М. В. Остроградский распространил начало возможных перемещений и на односторонние связи. Он доказал, что в этом случае для равновесия необходимо, чтобы возможная работа всех приложенных к телу сил была меньше или равна нулю (возможность отрицательной работы объясняется, конечно, тем, что движению приписывается знак в зависимости от направления).

Независимо от своего современника — английского физика Вильяма Гамильтона (1805—1865), М. В. Остроградский ввел в механику так называемый принцип наименьшего действия. Это один из важнейших законов механики. Он гласит, что при свободном перемещении тел из одного положения в другое движение происходит так, что работа сил имеет наименьшую величину.

Зарождение этого принципа в виде философской мысли, будто природа «стремится» к тому, чтобы все действия

совершались с наименьшей затратой энергии (или, как говорили тогда, силы), относится к давним временам. В XVII веке такая идея была высказана французским математиком Пьером Ферма (1601—1665), сумевшим применить ее к выводу закона преломления света.

Ферма предположил, что распространение света в воде и стекле встречает большее сопротивление, чем в воздухе. Он стал искать, по какому пути должен идти луч света, чтобы общее сопротивление в обеих средах (воздух — стекло) вместе было наименьшим. Понятно, что такой путь луч пройдет и в наикратчайшее время.

Оказалось, что для этого при переходе в более плотную среду луч должен преломиться, приблизившись к перпендикуляру, восстановленному в точке его падения к поверхности раздела. Отклонение должно быть таким, чтобы отношение синусов угла падения и преломления было равно отношению скоростей в двух средах.

Однако принцип наименьшего действия оставался отвлеченным и не мог быть признан физическим законом.

Впоследствии начало наименьшего действия получило обоснование и развитие в работах Эйлера, который показал, что этот принцип соблюдается и в движении тел под действием центральных сил, например планет.

Наконец Остроградский и Гамильтон, независимо друг от друга, придали этому принципу окончательную форму закона механики.

В тесной связи с исследованиями в механике стояли и математические работы М. В. Остроградского.

Этот замечательный русский математик развил так называемое вариационное исчисление, главнейшая задача которого — отыскание наибольшего и наименьшего значения различных величин. Примером вопросов, решаемых с помощью этого исчисления, может служить следующий: найти кривую, двигаясь по которой под действием тяжести тело пришло бы в кратчайшее время из одной точки над земной поверхностью в другую.

М. В. Остроградский исследовал и проблемы баллистики — науки о движении снаряда. Он работал и в области небесной механики, дав новые доказательства некоторым из ее теорем.

Работы М. В. Остроградского были большим шагом вперед в аналитической механике и математике. Они прославили имя этого замечательного русского ученого, и Па-

рижская Академия наук избрала его своим членом-корреспондентом.

Значительные успехи в динамике вращающегося тела были достигнуты благодаря работам русского математика С. В. Ковалевской (1850—1891).

Дочь генерала-артиллериста, С. В. Ковалевская получила хорошее образование. Еще в раннем возрасте она проявила замечательные математические способности. Пятнадцати лет С. В. Ковалевская уже брала уроки высшей математики в Москве. Через несколько лет она училась у одного из известнейших математиков Германии, Вейерштрасса, и слушала лекции знаменитого физика Гельмгольца.

По представлению Вейерштрасса, Геттингенский университет присудил С. В. Ковалевской за три математические работы ученую степень доктора без установленных для этого экзаменов.

В одной из этих работ С. В. Ковалевская исследовала вопрос о кольце Сатурна, развивая идеи знаменитого французского математика Пьера Лапласа (1749—1827), изложенные им в труде «Небесная механика».

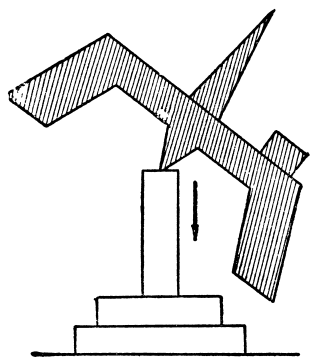
По возвращении в Россию С. В. Ковалевская не могла бы в те времена найти большего приложения своих математических познаний, чем преподавание арифметики в младших классах гимназии.

Просьба С. В. Ковалевской допустить ее к сдаче экзаменов на степень магистра при Московском университете была отклонена. Тогда С. В. Ковалевская решила покинуть Россию и вернулась в Берлин.

В 1883 году С. В. Ковалевская получила приглашение читать лекции по математике в Стокгольмском университете. Она уехала в Швецию, где прочитала двенадцать курсов по разным отделам математики.

Именно тогда С. В. Ковалевская написала самый важный из своих трудов — «Задача о вращении твердого тела вокруг неподвижной точки», посвященный вращению твердого тела. За эту работу Парижская Академия наук присудила ей специальную премию.

Премия была предназначена академией тому, чья работа станет новым этапом в развитии динамики вращающегося тела. Никому из математиков, исследовавших вращение тел после Эйлера и Лагранжа, не удалось до тех пор получить эту премию.



Волчок, вращение которого исследовала С. В. Ковалевская.

С. В. Ковалевская исследовала вращение особого рода волчка, отличавшегося от изученного Эйлером тем, что на внешнем крае его добавлен груз. Поэтому точка опоры волчка С. В. Ковалевской не совпадает с его центром тяжести, смещенным в сторону.

Решение этой задачи представило большие математические трудности. Оно требовало основательных специальных знаний, обладая которыми С. В. Ковалевская довела исследование до конца.

В 1889 году С. В. Ковалевская была избрана Российской Академией наук в члены-корреспонденты — первый случай в России, когда женщина получила такое звание.

Работа С. В. Ковалевской повлекла за собой ряд исследований вращения твердого тела другими математиками и механиками. Среди них видную роль играют русские ученые — Н. Е. Жуковский, А. М. Ляпунов, С. А. Чаплыгин.

Движение тел переменной массы

С развитием капитализма возникли новые технические задачи. Прогресс промышленности требовал экспериментальной и теоретической разработки новых проблем. Одна из них, например, движение вращающегося на станке веретена, на которое навивается нить, увеличивающая массу веретена. Разматывающийся рулон бумаги на валу типографской машины представляет, наоборот, пример уменьшения массы движущегося тела.

Немало подобных примеров и в природе.

На планеты постоянно падает большое количество метеоритов, увеличивающих массу планет. Комета по мере приближения к Солнцу, наоборот, рассеивает часть своего вещества.

Но в формулах динамики Эйлера масса считается постоянной. Значит, они не могут применяться для расчета

вращения веретена или рулона газетной бумаги. В некоторых случаях они непригодны и для решения вопросов о движении космических тел.

Нужно было, исходя из механики Ньютона и Эйлера, найти законы движения тел переменной массы. Эту проблему разрешил русский ученый-механик И. В. Мещерский (1859—1935).

Родиной И. В. Мещерского был Архангельск, где он окончил гимназию. Высшее образование И. В. Мещерский получил в Петербургском университете, в котором в 1882 году он был оставлен при кафедре механики.

В 1902 году Совет Петербургского политехнического института пригласил И. В. Мещерского заведовать кафедрой механики. В этом институте И. В. Мещерский оставался профессором до конца жизни.

Еще в самом начале своей научной деятельности И. В. Мещерский занялся исследованием законов движения тел переменной массы.

Допустим, что тело, движущееся под действием внешних сил, отделяет от себя частицы. При этом возникают реактивные силы.

С реактивной силой мы встречаемся на каждом шагу. Например, при выстреле из ружья приклад толкает в плечо стрелка: это реакция давления расширяющихся газов, выбрасывающих пулю. Такое же реактивное действие проявляют и частицы, отделяющиеся от тела.

Можно было бы изучать движение тела и отделяющихся частиц как одну систему точек. В этом случае масса системы остается постоянной. Если бы были известны положения и ускорения всех частиц в каждый момент, то можно было бы определить движение и переменной массы.

Но практически это невыполнимо, так как движение отделяемых частиц неизвестно.

Чтобы облегчить исследование, И. В. Мещерский сперва предположил, что частицы только отделяются от тела, но не движутся относительно него. В этом случае на тело не действуют реактивные силы, а лишь изменяется его масса.

Уравнения, выведенные при таком предположении, могут быть приложены к вращению веретен и разматывающихся рулонов бумаги. Они позволяли решать и некоторые задачи небесной механики.

И. В. Мещерский не только дал общие формулы движения тел переменной массы, но и сам решил много частных задач. Он исследовал, например, движение космического тела переменной массы под действием центральной силы (то-есть силы, направленной всегда к одной точке). Свои выводы он приложил к движению комет.

Позднее, в 1897 году, И. В. Мещерский дал решение проблемы о движении тела и для случая, когда частицы отделяются от него с любой относительной скоростью.

Эти уравнения приложимы, например, к ракетам, движущимся под действием реактивных сил, к движению реактивных самолетов и к другим проблемам механики.

В XIX веке еще не вполне было понятно значение исследований И. В. Мещерского, хотя проблема полета ракет поставлена очень давно. Развитие же авиации в наше время потребовало расчета движения тел переменной массы.

Выводы И. В. Мещерского приобрели особенно важное значение для расчета реактивных самолетов.

В настоящее время в авиации широко применяются воздушно-реактивные двигатели. Во время движения самолета с этим двигателем воздух попадает через входное отверстие и сжимается. В сжатом виде он поступает в камеру, куда впрыскивается керосин.

При сгорании этой смеси образуется большое количество горячих газов, приводящих в движение турбину самолета. Пройдя через турбину, газы удаляются через выходное отверстие, создавая реактивную тягу.

В результате работы двигателя масса самолета постепенно уменьшается, и расчет движения должен производиться по формулам, найденным И. В. Мещерским.

Еще большее значение выводы И. В. Мещерского имеют для расчетов движения ракет и самолетов с ракетным двигателем, так как относительная потеря массы у этих последних очень велика.

И. В. Мещерский не дожил до всеобщего признания всей важности его исследований. В эпоху, когда он делал свои открытия, достижения современной реактивной авиации показались бы фантазией. Ненужными считались тогда многим ученым и формулы И. В. Мещерского.

Но быстрое развитие авиационной техники в последние десятилетия заставило вспомнить о работах этого за-

мечательного русского механика. В наше время каждый инженер, проектирующий самолеты, пользуется выводами И. В. Мещерского. А в недалеком будущем эти выводы получат еще большее значение.

Разрешение проблем техники

Механики не только решали теоретические задачи, возникавшие перед техниками. Они часто заглядывали далеко вперед и указывали путь техникам.

Замечательный пример влияния теоретиков на развитие техники — деятельность известного русского математика П. Л. Чебышева (1821—1894).

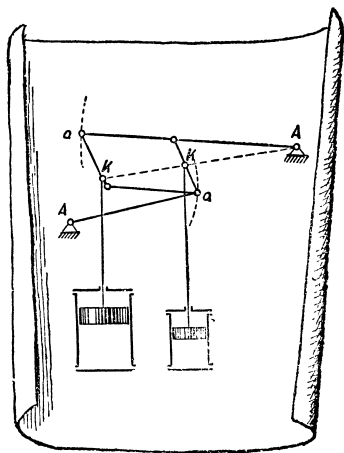
Шестнадцать лет П. Л. Чебышев поступил в Московский университет и уже через год представил научную работу, за которую был награжден медалью. Двадцати лет он окончил университет, хотя должен был сам зарабатывать средства для существования.

Через шесть лет по окончании университета П. Л. Чебышев был приглашен на кафедру математики в Петербургский университет, где он читал лекции почти до конца своей жизни. П. Л. Чебышев был избран членом как Петербургской, так и Парижской Академии наук.

Вся жизнь П. Л. Чебышева была непрерывным научным трудом. Он и умер, сидя за письменным столом.

Свой замечательный математический талант П. Л. Чебышев с успехом применил в области механики — для создания теории шарнирных механизмов.

В паровой машине важную роль играет так называемый параллелограмм Уатта. Это механизм, состоящий из четырех металлических



Параллелограмм Уатта. Точки *A* неподвижны. Точки *a* движутся по дугам круга. Точки *K* движутся по прямым линиям, и к ним присоединяются штоки цилиндров.

стержней, соединенных шарнирами. Стержни образуют параллелограмм, углы которого могут менять величину. При помощи этого механизма прямолинейное движение поршневого штока передается в машине Уатта качающемуся коромыслу.

Подобные «плоские механизмы» пользуются широким распространением для преобразования кругового движения в прямолинейное, и наоборот. Но они были несовершенны, и их работа сопровождалась трением, вследствие которого части машин быстро изнашивались.

Напрасно инженеры в течение семидесяти пяти лет трудились над усовершенствованием параллелограмма Уатта, подбирая размеры частей. Им не удалось устранить его недостатки.

П. Л. Чебышев подошел к этой проблеме как математик. Он поставил перед собой теоретическую задачу: найти такую комбинацию соединенных шарнирами стержней, чтобы передаваемое ими движение как можно меньше отличалось от прямолинейного.

Метод, примененный П. Л. Чебышевым, был чисто математический. На его сущности останавливаться мы не будем. Математику удалось решить техническую задачу. Он указал ряд новых конструкций, дающих почти прямолинейное движение с любой степенью приближения к нему.

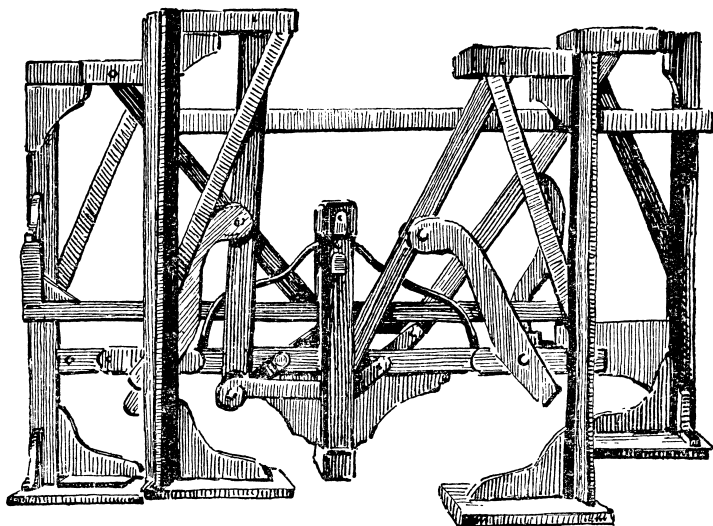
Некоторые из этих механизмов и в наше время находят применение в различных приборах.

Продолжая исследования, П. Л. Чебышев показал, что с помощью шарнирных механизмов можно воспроизвести вращательное движение. При этом вращение может происходить вокруг двух различно направленных осей.

Наконец, П. Л. Чебышев разработал новый тип непрерывно работающих механизмов, в которых одно звено совершает прерывное движение. Такова его знаменитая «стопоходящая» машина, переступающая подобно животным.

Более сорока различных оригинальных механизмов было создано этим математиком: гребной механизм, подражающий движению весел лодки, самокатное кресло, сортировальная машина и другие, до сих пор применяемые в технике.

В середине XIX века новая проблема механики была поставлена артиллерийской техникой.



«Стопоходящая» машина П. Л. Чебышева — механизм, осуществляющий движение с остановками.

Гладкоствольные орудия стреляли шаровидными бомбами. Сопротивление воздуха уменьшало дальность полета и меткость стрельбы. Чтобы избавиться от этих недостатков, военные инженеры в 60-х годах ввели удлиненные, заостренные снаряды. Но испытание показало, что сопротивление воздуха легко опрокидывает цилиндрический снаряд, который ударяет в цель боком или основанием.

Тогда решили придать снаряду вращательное движение. С этой целью стали снабжать внутреннюю поверхность ствола пушек винтовой нарезкой.

Применение нарезных пушек требовало разработки вопроса о движении цилиндрического заостренного снаряда. Эту проблему одним из первых разрешил русский артиллерист Н. В. Маиевский (1823—1892).

Окончив в возрасте двадцати лет Московский университет, Н. В. Маиевский начал военную службу юнкером в артиллерии. Получив офицерский чин, он поступил в Михайловскую артиллерийскую академию, по окончании которой продолжал военную службу в гвардейской конной

артиллерии. Но через четыре года он был привлечен к работам Военно-ученого комитета для исследовательской работы.

Научная деятельность Н. В. Маиевского была посвящена баллистике.

Сперва Н. В. Маиевский по поручению военного министерства с большим успехом проектировал гладкоствольные орудия, которые давали при испытаниях прекрасные результаты. С 1858 года он занялся изучением сопротивления воздуха, испытываемого сферическим снарядом.

До того времени вопрос о движении снаряда, выброшенного с большой начальной скоростью, не был удовлетворительно разрешен, так как влияние на него сопротивления воздуха было плохо изучено. Расчеты, основанные на опытах французских артиллеристов, не оправдались во время Крымской кампании.

Результаты исследований Н. В. Маиевского были опубликованы Петербургской Академией наук. После этого Н. В. Маиевский был приглашен занять в Михайловской артиллерийской академии кафедру баллистики, оставленную академиком М. В. Остроградским.

Изучение полета сферических снарядов привело Н. В. Маиевского к убеждению, что артиллерия должна перейти на нарезные орудия, стреляющие продолговатыми снарядами. Поэтому он занялся исследованием их движения.

В то время этот вопрос был совершенно новым. Нужно было на опыте изучить влияние формы, веса и вращения снарядов на их траекторию. Требовалось создать теорию движения этих снарядов и составить артиллерийские таблицы.

Н. В. Маиевский организовал опыты стрельбы продолговатыми снарядами на Волковом поле и получил блестящие результаты. Он читал публичные лекции офицерам, пропагандируя идею перевооружения русских войск нарезными орудиями.

Самым трудным был вопрос о влиянии вращения снаряда на его полет. Н. В. Маиевский изложил результаты исследования этой проблемы в большом труде «О влиянии вращательного движения на полет продолговатых снарядов в воздухе», изданном в 1865 году. В этой работе он доказал, что такой снаряд сохраняет, в общем, направление своей оси. Но вследствие отклоняющего влияния воз-

духа ось снаряда вращается около касательной к его траектории.

Московский университет за эти исследования присудил Н. В. Маиевскому ученую степень доктора прикладной математики, а Петербургская Академия наук избрала его своим членом-корреспондентом.

Большое влияние на развитие прикладной механики оказал известный русский ученый академик А. Н. Крылов (1863—1945).

Сын состоятельного землевладельца, А. Н. Крылов до девяти лет прожил в деревне, а затем был увезен своим отцом на юг Франции, в Марсель, где пробыл три года и учился в частном пансионе. По возвращении в Россию А. Н. Крылов успешно выдержал вступительный экзамен в Петербургское Морское училище.

Дядя А. Н. Крылова — будущий знаменитый математик А. М. Ляпунов писал в то время диссертацию и оказал влияние на мальчика, заинтересовав его математикой. Окончив в 1884 году Морское училище, А. Н. Крылов обладал большими математическими познаниями. Он был прикомандирован к Главному гидрографическому управлению и начал исследование девиаций магнитного компаса, то-есть отклонений магнитной стрелки под влиянием железных частей судна.

Скоро, однако, А. Н. Крылов захотел расширить область своих исследований, занявшись разработкой теории кораблестроения. Чтобы подготовиться к этому, он поступил на кораблестроительное отделение Морской академии. В 1890 году А. Н. Крылов блестяще окончил Морскую академию. Его имя было занесено на мраморную доску, и он был оставлен для подготовки к профессорскому званию.

Исследования А. Н. Крылова в теории кораблестроения начались опубликованием в 1893 году нового метода расчета пловучести и устойчивости корабля. Эти методы с тех пор применялись на практике всеми кораблестроителями.

Изучая проблему качки корабля, А. Н. Крылов разработал теорию килевой качки. Когда судно качается на волнах, в его корпусе возникают напряжения, величина которых не поддавалась определению.

А. И. Крылов первый указал, что корпус судна вибрирует и при совпадении периода собственных колебаний судна с периодом колебаний моря должно наблюдаться

явление резонанса. Причиной вибраций корпуса судна являются также толчки судовой машины. В случае явления резонанса очень затрудняется артиллерийская стрельба и даже пребывание на судне становится мучительным.

«Надо привести еще один вопрос, — писал А. Н. Крылов, — который возник в связи с увеличением длины судов и мощности устанавливаемых на них механизмов, в особенности поршневых, — это вопрос о вибрации или сотрясениях корабля, вызываемых работой машины... Корабль можно уподобить громадному упругому стержню или гигантской ножке камертона... Корабль имеет определенные периоды свободных собственных упругих колебаний — это его тоны и обертоны. Возбуждающие же силы суть неуравновешенные силы инерции движущихся частей машины, частота изменяемости которых пропорциональна числу оборотов ее, т. е. равна или этому числу оборотов, или удвоенному, или утроенному и т. д. Всякий раз, когда период этой изменяемости, или частота ее, будет близок к одному из периодов, или частот, свободных колебаний корабля, имеет место резонанс и возникает вибрация корабля. Зная причину этого явления, можно его предвычислить и — или устранить, или низвести до допустимых пределов».

Как практик-кораблестроитель А. Н. Крылов пришел к выводу, что для уменьшения вибрации корабля нужно увеличивать жесткость той части корпуса, где установлены машины.

Решение проблемы полета

Наблюдение парящего полета птиц и воздушного змея убеждало, что если воздушный поток встречает плоскость, наклонную к его направлению, то возникает подъемная сила. Следовательно, двигаясь вперед, наклонная плоскость может подняться вместе с прикрепленным к ней грузом.

Руководствуясь этим соображением, русский морской офицер и изобретатель А. Ф. Можайский (1825—1890) создал в 1876 году первую в мире модель самолета, которая могла свободно лететь, сохраняя равновесие.

Судьба А. Ф. Можайского может служить примером тех трудных условий, в которых работали русские ученые и изобретатели в царской России.

По окончании Морского кадетского корпуса А. Ф. Можайский плавал на парусных судах. Но в то время уже началось строительство и паровых судов. В 1860 году А. Ф. Можайский получил назначение оснастить механизмами строившееся на русской верфи паровое судно «Всадник». Эта работа дала ему основательные знания судовых машин.

Вскоре, однако, морская служба А. Ф. Можайского окончилась, так как царское правительство решило сократить военный флот. А. Ф. Можайский поселился в своем поместье и был выбран почетным мировым судьей. В это время, повидимому, он и заинтересовался проблемой полета на аппарате тяжелее воздуха.

Однако, чтобы производить экспериментальные исследования, нужны были средства для постройки крупных моделей самолета, но А. Ф. Можайский не располагал ими.

В то время не были еще решены важнейшие вопросы авиации. Никто не знал, как изменяется подъемная сила крыла в зависимости от угла наклона и скорости поступательного движения.

Размышляя над постановкой первых опытов, А. Ф. Можайский уподобился путешественнику без карты и компаса в неизвестной местности. Но он справился с поставленной перед самим собой задачей.

Для испытания подъемной силы крыла А. Ф. Можайский установил его на тележке. При поступательном движении тележки наклонное крыло поднималось на воздух. По весу крыла можно было определить развивавшуюся подъемную силу, которая менялась в зависимости от наклона.

На таком немудреном приспособлении А. Ф. Можайский изучал законы аэродинамики. Он нашел наивыгоднейший наклон крыла и определил испытываемое им сопротивление воздуха. Свои выводы изобретатель проверял на маленьких самодельных моделях. Но это не удовлетворило его.

Может ли крыло поднять человека?

Чтобы решить этот вопрос, А. Ф. Можайский задумал сам подняться на воздух при помощи большого воздушно-змея. Никто до него не осмеливался сделать этот рискованный опыт.

Змей был сделан из деревянных брусков и обтянут парусиной. Его поставили на телегу, в которую впрягли

тройку лошадей. А. Ф. Можайский был крепко привязан к змею.

Когда кучер погнал по дороге лошадей, змей стал подниматься. Кучер распускал веревку, и змей набирал высоту, поднимая с собой изобретателя.

А. Ф. Можайскому удалось благополучно спуститься на землю, доказав возможность полета.

После этого А. Ф. Можайский поехал в Петербург с летающей моделью, чтобы получить от правительства средства на постройку большого самолета, который мог бы служить для дальнейших опытов.

В Петербурге он проделал ряд успешных опытов со своей моделью, поразивших присутствовавших ученых, инженеров и военных. Всем стало ясно, что проблема полета на аппарате тяжелее воздуха разрешена.

Модель Можайского получала движение от вращения гребного винта, какие устанавливаются и на морских судах. В воздухе ее поддерживали неподвижные прямоугольные плоскости — крылья, поставленные под углом к направлению полета.

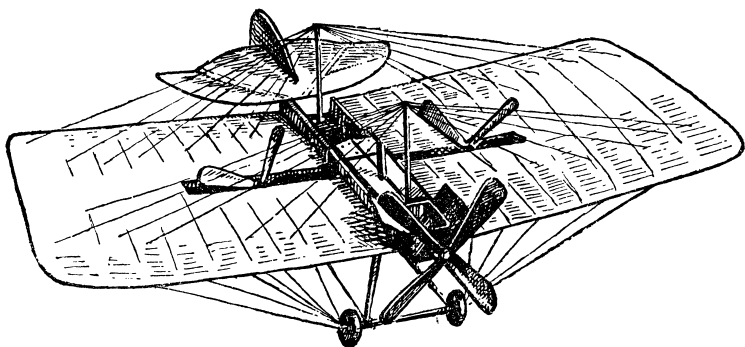
Чтобы построить по своей модели самолет, А. Ф. Можайский обратился к военному министру с просьбой отпустить необходимые для этого средства. По приказу министра специальная комиссия должна была рассмотреть проект изобретателя.

К работе комиссии был привлечен и знаменитый русский химик Д. И. Менделеев (1834—1907), который настаивал, чтобы А. Ф. Можайскому было выдано три тысячи рублей на производство дальнейших опытов.

Но даже эта недостаточная сумма выдавалась частями, с большими задержками. Изобретатель, когда ему не хватило отпущенных средств, был вынужден продать собственное небольшое имение, чтобы продолжать опыты.

А. Ф. Можайский поставил себе целью «исследовать и приискать наилучшую форму винта двигателя аппарата в отношении числа перьев или лопастей его, изгиба их или угла с валом». Никто ранее не ставил перед собой эту задачу, решенную вполне только позднее русским ученым-механиком Н. Е. Жуковским (1847—1921).

Преодолев много трудностей, А. Ф. Можайский построил большой самолет, установив на нем сконструированную им же очень легкую паровую машину. Как доказывают документальные свидетельства, изобретатель пробо-



Общий вид модели самолета А. Ф. Можайского.

вал летать. Повидимому, в 1883 году он удачно поднялся над землей и пролетел некоторое расстояние в горизонтальном направлении.

Самолет Можайского в основном был очень сходен с современными самолетами, то-есть имел крылья, корпус, оперение, шасси и силовую установку. Через десять лет братья Райт в Америке совершили короткий полет на планере, на котором был установлен автомобильный мотор. Вслед за ними европейские инженеры стали строить аэропланы и совершать на них полеты. Наконец в 1909 году француз Блерио перелетел на своем аэроплане через пролив Ла-Манш. Параллельно с развитием авиационной практики развивалась и теория. Проблема полета на аппаратах тяжелее воздуха заключалась в создании подъемной силы и тяги для поступательного движения.

Огромное значение для развития авиации имели исследования замечательного русского ученого Н. Е. Жуковского.

Детство Н. Е. Жуковский провел в селе Орехове, бывшей Владимирской губернии, в которое он не раз возвращался и позднее. По окончании средней школы он поступил в Московский университет.

Еще в университете любимейшими предметами Н. Е. Жуковского были физика и механика. Особенное его внимание привлекала динамика жидкостей и газов.

По окончании университета Н. Е. Жуковский написал в 1876 году работу о движении жидкостей. В 1882 году он представил диссертацию на тему «О прочности движения»

и через четыре года занял кафедру механики в Московском университете.

Важнейшие исследования Н. Е. Жуковского были посвящены движению жидкостей и газов. Эти исследования позволили разрешить ряд проблем авиации.

Простейшая из них — полет воздушного змея, то-есть пластинки, поставленной под некоторым углом к направлению течения воздуха.

Воздушный змей находится под действием трех сил: собственной тяжести, давления воздуха и натяжения шнура, укрепленного в центре давления. Вследствие давления струи воздуха развивается подъемная сила, и пластинка поднимается вверх. Равновесие устанавливается, когда равнодействующая подъемной силы и силы тяжести будет направлена прямо противоположно натяжению шнура.

Еще в 1889 году Н. Е. Жуковский начал опыты, связанные с практикой авиации: испытывал модели летательных машин и планеров, исследовал траектории полетов.

В дореволюционной России Н. Е. Жуковский не имел в своем распоряжении достаточных средств для широкой постановки исследований.

В 1902 году при механическом кабинете Московского университета была построена первая в России (и вторая в мире) аэродинамическая труба. В ней Н. Е. Жуковский производил свои исследования лобового сопротивления шара и пластинки, определение центра давления и других проблем теории авиации.

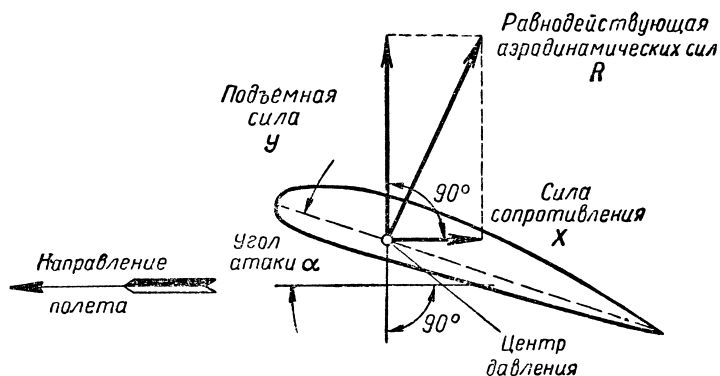
В 1904—1906 годах Н. Е. Жуковский руководил организацией новой аэродинамической станции в поселке Кучине под Москвой.

Еще накануне первой мировой войны Н. Е. Жуковский разрешил несколько важнейших вопросов авиации. Он дал простой (графический) метод решения уравнений движения самолета. По его методам и формулам рассчитывались самолеты в течение войны 1914—1918 годов.

Советское правительство высоко оценило заслуги Н. Е. Жуковского, которого В. И. Ленин назвал «отцом русской авиации». Оно учредило премию имени Н. Е. Жуковского за работы по математике и механике.

Н. Е. Жуковский был готов начать новые исследования в теории и практике авиации. Смерть в 1921 году прервала работу этого замечательного математика и механика.

Важнейшей задачей, стоявшей перед Н. Е. Жуковским,



Профиль крыла современного самолета.

было объяснение происхождения подъемной силы крыла и определение зависимости ее от угла наклона и профиля крыла.

Опыт показал, что крыло самолета не должно быть плоским. Наиболее выгодный профиль крыла имеет вид «поверхности Жуковского»: сверху крыло выпукло, снизу — вогнуто; наибольшая кривизна профиля — у лобового ребра крыла, разрезающего воздух; там же крыло имеет и наибольшую толщину. Угол наклона измеряется относительно хорды, соединяющей две самые нижние точки профиля крыла.

Крыло такой формы имеет замечательное свойство: подъемная сила развивается не только при угле наклона, большем или равном нулю, но даже при небольших отрицательных углах (до -5°).

Почему же возникает подъемная сила даже при отрицательном угле наклона?

Н. Е. Жуковский указал, что это явление можно объяснить, если вокруг поперечного сечения крыла возникает вихреобразное движение воздуха; скорость циркуляции воздуха не везде одинакова: под крылом она меньше, чем над крылом; поэтому крыло испытывает большее давление снизу, чем сверху. Этим и объясняется возникновение подъемной силы.

Н. Е. Жуковский исследовал различные формы крыла с целью определения наиболее выгодного профиля его. Он

дал формулы для вычисления их подъемной силы и определения положения центра давления. По положению же центра давления можно судить и об устойчивости самолета.

Движение вперед сообщается самолету пропеллером, или гребным винтом. Пропеллер состоит из лопастей, насаженных на горизонтальной оси. Мотор вращает ось, и при вращательном движении лопастей возникает тяга, сообщающая поступательное движение самолету.

Каждая лопасть гребного винта по своему профилю — в уменьшенном виде крыло самолета. Для определения поступательного движения нужно знать силу тяги винта и лобовое сопротивление воздуха.

Н. Е. Жуковский разработал вихревую теорию гребного винта. Для этого потребовалось много опытов и сложных математических расчетов. Было необходимо определить, как распределяется скорость воздушного потока перед гребным винтом и позади него. Современные самолеты рассчитываются по методам Н. Е. Жуковского.

Свои исследования Н. Е. Жуковский всегда старался проверить опытом. Он справедливо утверждал, что законы механики не могут быть познаны без эксперимента.

«Нужен действительно и будет решать дело разумный и твердый опыт, — любил повторять слова Д. И. Менделеева этот замечательный ученый, — а молодое и неопытное умственное построение пойдет на поводу в ту или другую сторону, пока приученное опытом к верной дороге само не станет вести за собой всю сущность опытного знания».

Продолжателем исследований Н. Е. Жуковского в теории авиации был его ученик С. А. Чаплыгин (1869—1942).

С. А. Чаплыгин разрабатывал теорию движения твердого тела в газах со скоростями, приближающимися к скорости звука.

Если скорость движения сравнительно с распространением звука (330 метров в секунду) невелика, то газ можно рассматривать как несжимаемую жидкость. И сделанные в таком предположении расчеты оправдываются.

Когда же скорость тела достигает 80 метров в секунду, необходимо принимать во внимание и сжимаемость воздуха. Иначе расчет движения тела окажется ошибочным.

В начале нашего века скорость самолетов не превы-

шала 10—12 метров в секунду. Поэтому законченная в 1903 году работа С. А. Чаплыгина о методах расчета движения самолета при больших скоростях не привлекла внимания.

В наше время скорость реактивных самолетов-истребителей уже достигает скорости звука. Поэтому исследования С. А. Чаплыгина, далеко опередившие свою эпоху, приобрели теперь огромное значение.

Возможная скорость самолетов, нуждающихся в поддержке воздуха, не беспредельна: при увеличении ее сопротивление воздуха возрастает все в большей степени и увеличивается относительный расход энергии на преодоление его. Поэтому все меньшее количество энергии двигателя идет на полезную работу.

Если же подняться на высоту 15—18 километров, где сопротивление воздуха сильно уменьшается, то не хватает кислорода для сжигания топлива в моторе.

Поэтому значительное увеличение скорости воздушного транспорта может дать только бескрылая ракета. Она не нуждается в поддержке воздуха и может лететь на любой высоте. Ей не нужен и кислород атмосферы, так как ракета берет с собой запас не только топлива, но и необходимого ей кислорода.

Полет в мировое пространство

Законы небесной механики позволяют сделать безошибочный расчет скоростей и направлений полета межпланетного корабля. Затруднение в осуществлении путешествия на планеты заключается главным образом в трудностях безопасного взлета и посадки.

Впервые проблема полета в мировое пространство теоретически была разрешена русским ученым К. Э. Циолковским (1857—1935). Сын лесничего, К. Э. Циолковский был самоучкой. Не имея средств, чтобы получить систематическое образование, он сам прорабатывал курсы начальной и высшей математики, физики и механики.

Осенью 1879 года юноша сдал экзамен на звание учителя и был назначен преподавателем арифметики и геометрии в Боровское уездное училище Калужской губернии.

В свободное от занятий время К. Э. Циолковский са-

мостоятельно разрабатывал различные вопросы естествознания. За свою работу «Механика животного организма» он был единогласно избран в члены Петербургского физико-химического общества.

С 1885 года К. Э. Циолковский работал над проблемой управляемого металлического аэростата (дирижабля). Вслед за тем он перешел к исследованию движения реактивных приборов.

Сперва К. Э. Циолковский считал ракету применимой только в военном деле для сигнализации и переброски снарядов. Но затем он понял, что большая ракета может служить и для перелета на огромные расстояния и даже для полета в мировое пространство.

Ракета имеет большое преимущество перед другими двигателями в том, что она не нуждается в воздушной среде. Воздух, поддерживающий движущийся самолет, служит только препятствием для полета ракеты.

Это свойство ракеты было по достоинству оценено К. Э. Циолковским, занявшимся теоретическим исследованием возможности космического путешествия.

Совершенно самостоятельно К. Э. Циолковский теоретически определил влияние сопротивления воздуха на ракету. Он исследовал ее движение под влиянием тяжести и вычислил количество топлива, необходимое, чтобы покинуть Землю.

В 1903 году, а затем в 1911—1912 годах К. Э. Циолковский опубликовал результаты своих исследований о полете в мировое пространство. Он опубликовал формулы для расчета начального веса ракеты, ее скорости и работы, которую нужно произвести, чтобы ракета навсегда потеряла связь с Землей.

Так называемую параболическую скорость, при которой тело навсегда отрывается от планеты, можно найти по формуле $v = \sqrt{gD}$, где g — ускорение свободного падения на ее поверхности, D — средний диаметр планеты. Для Земли эта скорость равна $\sqrt{9,81 \cdot 12\,742\,000} = 11\,181$ метру в секунду.

На Луне ускорение свободного падения приблизительно в шесть раз меньше, то-есть равно около 1,63 метра за каждую секунду. Диаметр Луны 3470 километров. По приведенной формуле параболическая скорость на Луне равна только около 2390 метров в секунду.

Первая проблема, которую должна решить техника межпланетных путешествий, — отлет с Земли. Как разорвать узы тяготения, делающего человека ее пленником?

При скорости в 7,9 километра в секунду в направлении касательной к поверхности земного шара, на расстоянии земного радиуса от центра Земли, тело вечно двигалось бы по круговой орбите около нее.

При больших скоростях оно описывало бы эллипс, в одном из фокусов которого была бы Земля. Но при скорости 11,2 километра в секунду Земля не удержала бы его, и тело унеслось бы в пространство, потеряв с нею связь.

Для осуществления полета в мировое пространство нужно, чтобы летательный снаряд развил скорость 11,2 километра в секунду.

Человек без вреда для себя может двигаться с любой равномерной скоростью. Он участвует в обращении Земли вокруг Солнца со скоростью около 30 километров в секунду и в движении солнечной системы вокруг центра Галактики со скоростью больше 250 километров в секунду. Только значительное ускорение может повредить человеческому организму.

Безнаказанно для себя в течение непродолжительного времени человек может вынести ускорение, превосходящее в три-четыре раза ускорение свободного падения. Следовательно, межпланетный летательный снаряд должен двигаться с ускорением, не превосходящим 40 метров за каждую секунду. В течение 5 минут такого движения он разовьет скорость (не учитывая сопротивления воздуха) до 12 тысяч метров в секунду.

Сообщить летательному снаряду такое ускорение возможно разными способами. Можно было бы, например, «выстрелить» им в межпланетное пространство из электромагнитной пушки.

Как известно, внутри спирали из проводника, по которому проходит ток, возникает магнитное поле. Такая спираль — соленоид — втягивает в себя стальное тело.

Расположим один за другим ряд больших соленоидов. Как только ток будет включен в первом соленоиде, снаряд втянется в него с некоторым ускорением. Достигнув середины длины первого соленоида, он автоматически выключит в нем ток и включит его во втором, вследствие чего получит новое ускорение. Продолжая автоматически вы-

ключать ток в том соленоиде, в котором он находится, и включать его в следующем, снаряд будет развивать все большую скорость. Наконец, когда он будет двигаться со скоростью 11,2 километра в секунду, снаряд может оторваться от Земли.

Однако сопротивление воздуха делает очень трудным осуществление такого проекта. Помимо того, снаряд с пассажирами внутри, выброшенный в мировое пространство, стал бы игрушкой инерции и тяготения. Он вечно обращался бы вокруг Солнца по орбите, вид которой зависел бы от направления и момента выстрела.

Земля движется по эллипсу, близкому к кругу, со скоростью около 30 километров в секунду. Если выбросить снаряд в плоскости земной орбиты по направлению движения Земли, то относительно Солнца он получит скорость 41,2 километра в секунду. В этом случае снаряд будет обращаться по удлинённому эллипсу, который будет касаться земной орбиты в момент наибольшего приближения снаряда к Солнцу.

Если же выстрелить в обратном направлении, то скорость снаряда относительно Солнца будет равна только 18,8 километра в секунду. Снаряд станет обращаться вокруг Солнца по удлинённому эллипсу, касающемуся земной орбиты в момент наибольшего удаления от Солнца.

Пассажиры снаряда не могли бы изменить направление его движения, чтобы опуститься на какую-либо планету или возвратиться на Землю. Такую возможность может дать только ракета.

Ракета движется под реактивным действием вытекающих из нее газов. Газы образуются от сгорания жидкого или твердого топлива. Как показал расчет, на ракете нельзя поместить такое количество горючего (угля, бен-

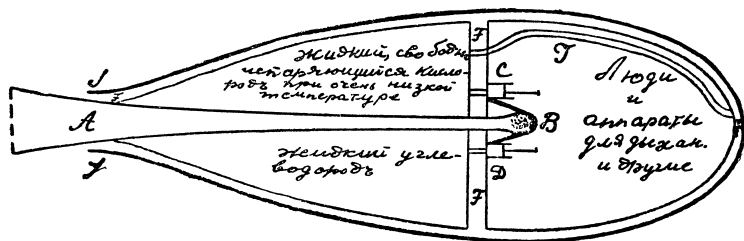
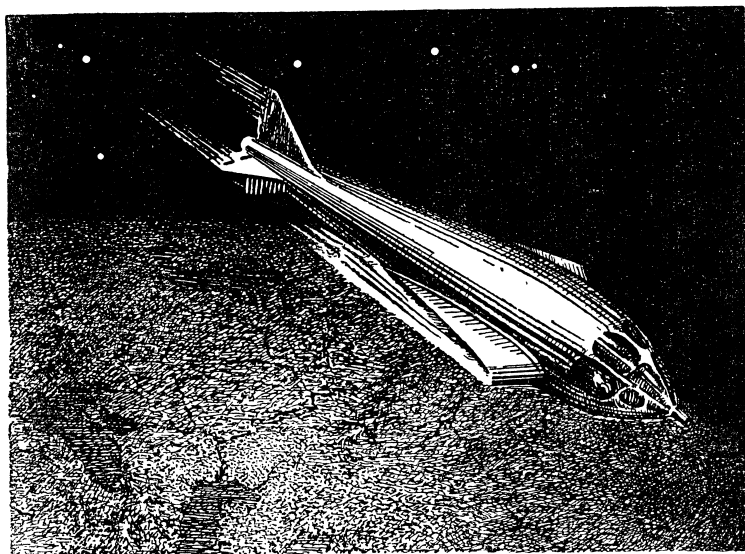


Схема космической ракеты, сделанная К. Э. Циолковским.



Посадочный планер, отделившийся от корпуса космического корабля, приближается к земной поверхности.

зина и т. п.), чтобы можно было пользоваться ракетным двигателем во все время космического путешествия. Поэтому, оторвавшись от Земли, было бы необходимо прекратить работу ракетного двигателя, используя движение ракеты по инерции.

С остановленным двигателем ракета двигалась бы по законам Кеплера, подобно планетам и их спутникам.

Нужно отправить ракету так, чтобы описываемый ею эллипс коснулся орбиты той планеты, которую намечено посетить. Момент отправления должен быть выбран с таким расчетом, что, когда ракета приблизится к орбите планеты, эта последняя должна находиться недалеко от ракеты.

Пролетев вблизи планеты или обогнув ее, ракета будет продолжать свой путь по эллиптической орбите (отклонение от этого пути притяжением планеты должно быть исправлено действием ракетного двигателя). Расчет ведется так, что, когда ракета подойдет к земной орбите, Земля будет находиться вблизи.

Облетев несколько раз Землю и пересекая каждый раз атмосферу, ракета замедлит свое движение. Тогда ее пассажиры могут совершить посадку на специальном планере, предоставив ракете упасть на Землю.

Заключение

Механика — наука о движении тел и о силах, сообщающих им движение. Она могла быть создана только на основе данных опыта и наблюдений. Аксиомы механики — истины, полученные из опыта. Законы механики только тогда оправдываются, когда они выведены из таких аксиом.

В древности Архимеду удалось установить закон равновесия сил, приложенных к рычагу. Доказательство закона рычага, данное этим математиком, основывалось на опытах со взвешиванием тел. Происхождение этих аксиом проявило себя даже в их формулировке.

Например, «равные веса, действуя на равных расстояниях от точки опоры невесомого стержня, уравновешиваются».

Вне всякого сомнения происхождение из опыта и следующей аксиомы: «Из равных весов, действующих на неравных расстояниях, перевешивает отдаленный».

Для человека, никогда не видевшего процесса взвешивания на весах с коромыслом, эти аксиомы едва ли были бы так очевидны, какими они кажутся нам.

Выведенный из этих аксиом принцип рычага лег в основу античной статики твердого тела. Этот закон рычага оправдывался на опыте.

Другое дело — динамика, созданная Аристотелем. Она была построена на умозрительных положениях. Поэтому ее выводы не согласовывались с действительностью.

Галилей увековечил свое имя в истории науки, обратившись к опыту. Он не захотел признать кажущегося на первый взгляд правильным утверждения Аристотеля, будто тяжелое тело падает быстрее легкого. Сбрасывая тяжести с вершины башни, Галилей убедился, что скорость падения тел не зависит от их тяжести.

Столь же неверным оказалось и мнение, что для поддержания равномерного прямолинейного движения нужно постоянное действие силы.

Причиной этих заблуждений Аристотеля было незнание им инерции движения. Построенная Аристотелем динамика была бы справедлива, если бы тела не обладали инерцией. Но в действительности тела сохраняют состояние как покоя, так и движения. Поэтому они подчиняются законам динамики Галилея, построенной исходя из свойства инерции.

Обладают или не обладают тела природы инерцией, это можно было узнать только из наблюдений и опытов. Зная же о существовании инерции, можно было делать выводы законов движения тел.

Если бы Галилей ограничивался логическими рассуждениями, не прибегая к проверке своих выводов на опыте, он также мог бы впадать в ошибки.

Но опыта недостаточно для развития механики. И до Галилея многие наблюдали, что скорость свободного падения тел не зависит от их веса. Мысль об инерции не была совсем чужда некоторым его предшественникам.

Однако не они, а Галилей считается основателем динамики, потому что только он вывел законы движения тел. Опыт дает лишь материал для математической обработки, а не самые законы, которые были выведены Галилеем из данных опыта.

Наконец для развития механики необходима и гипотеза. Она объясняет причину наблюдаемых явлений и, оправданная последующими опытами, становится теорией.

Притяжение Луны Землей и планет Солнцем было сперва гипотезой. После проверки ее Ньютоном всемирное тяготение стало физическим законом. Опыт английского химика и физика Генри Кэвендиша (1731—1810), произведенный в 1798 году, доказал существование притяжения между всеми телами.

Не следует думать, будто опыт имел такое большое значение только при заложении основ механики. Он не потерял этого значения и в настоящее время.

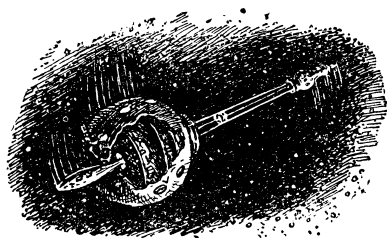
Происхождение подъемной силы самолета казалось очень ясным. Никто не мог предполагать, что подъемная сила может возникнуть при нулевом или отрицательном угле атаки. Но опыт, к удивлению экспериментаторов, показал возможность этого явления. Он привел к созданию более совершенной теории.

Великий русский ученый М. В. Ломоносов указал путь, по которому должны идти исследователи природы: «Из

наблюдений устанавливать теорию, через теорию исправлять наблюдения — есть лучший способ к изысканию правды».

Механика, как и другие науки о природе, продолжает развиваться. Перед ней множество не решенных еще проблем. Практика жизни ставит всё новые вопросы, ожидающие своих исследователей.

Но теперь уже легче решать возникающие задачи механики. История науки указывает, какими путями шли к открытиям Галилей, Гюйгенс, Ньютон, Ломоносов, Эйлер, Жуковский, Циолковский и другие испытатели природы. Нужно только следовать их примеру беззаветной преданности науке, направленной на благо человечества.



О Г Л А В Л Е Н И Е

Древние машины	3
Что такое движение	9
Догонит ли Ахиллес черепаху?	12
Механика древних философов	15
Возникновение математики у греков	22
Открытие законов равновесия тел	27
Развитие античной статики	35
Античная механика и система мира	42
Крушение античной культуры	46
Возрождение античной механики	49
Наука в средние века в Европе	53
Призыв к наблюдению и опыту	57
Путь полета пушечного ядра	64
Система мира Коперника	67
Борьба за учение о движении Земли	72
Ниспровержение аристотелианства	77
Галилей — основоположник динамики	82
Открытие равномерности колебаний маятника	87
О наклонной плоскости	90
Инерция движения	93
Законы свободного падения	96
Проверка опытом законов падения	100
Проблема траектории брошенного тела	102
Гидростатика в XVI—XVII веках	105
Возникновение гидродинамики	111
Механика газов в XVII веке	115
Открытие закона колебаний маятника	122
Удар тел	129
Возникновение идеи о всемирном тяготении	135
Заложение основ небесной механики	139
Механика Ньютона	145

Возникновение аналитической механики	149
Законы вращения тел	151
Вращение твердых тел	153
Вращение Земли	158
Начало Даламбера	164
«Инерционные» силы на вращающейся Земле	170
Возникновение понятия о работе	172
Сохранение кинетической энергии	176
Развитие механики в России	181
Дальнейшее развитие аналитической механики	183
Движение тел переменной массы	188
Разрешение проблем техники	191
Решение проблемы полета	196
Полет в мировое пространство	203
Заключение	208

Д Л Я С Р Е Д Н Е Й Ш К О Л Ы

Бублейников Феофан Дмитриевич

О Д В И Ж Е Н И И

Ответственный редактор *М. А. Зубков* Художественный редактор *Н. Г. Холодовская*. Технический редактор *Н. П. Самохвалова*. Корректоры *Р. С. Мишелевич* и *А. Б. Стрельник*.

Сдано в набор 7/IV 1956 г. Подписано к печати 1/VIII 1956 г. Формат 84 × 108¹/₃₂ — 13,25 печ. л. = 10,88 усл. печ. л. (11,15 уч.-изд. л.). Тираж 100 000 экз. А09930. Заказ № 537. Цена 4 р. 35 к.

Детгиз. Москва, М. Черкасский пер., 1.

Фабрика детской книги Детгиза. Москва, Суцевский вал, 49.

Цена 4 р. 35 к.

Ф. Д. Будейников о движении

