Ф. Д. БУБЛЕЙНИКОВ
Е. Я. МИНЧЕНКОВ

ОЧЕРК РАЗВИТИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

УЧПЕДГИЗ · 1961

Ф. Д. БУБЛЕЙНИКОВ и Е. Я. МИНЧЕНКОВ

ОЧЕРК РАЗВИТИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР
Москва—1961

ПРЕДИСЛОВИЕ

Механика — одна из наиболее древних наук. Успехи ее развития были тесно связаны с достижениями техники — применением подъемных и военных метательных машин, изобретением колесных часов, огнестрельного оружия и т. д. — и с решением проблем теоретической астрономии. Развитие же техники зависело, с одной стороны, от роста производительных сил и изменения производственных отношений, с другой стороны — от уровня развития науки вообще и механики в частности.

Основные принципы механики были выведены из повседневного опыта, и открытие их — яркий пример значения вдумчивого отношения ученых к явлениям, доступным наблюдению без помощи каких-либо приборов.

Галилей, Гюйгенс и некоторые другие ученые, желая увлечь на путь исследований читателей, откровенно рассказывали на страницах своих трудов об опытах и наблюдениях и сопровождающих их логических построениях, не скрывая допущенных ими в некоторых случаях ошибок и заблуждений. Поэтому знакомство с историей механики имеет большое значение для развития у учащихся наблюдательности и склонности к самостоятельному мышлению. Отсутствие в программе средней школы исторического освещения многих вопросов механики снижает уровень общего образования школьников.

Предлагаемая вниманию читателя книга предназначена для широкого круга лиц, изучающих курс физики в объеме средней школы и интересующихся историей естествознания. Она может быть полезной и учителю физики, привлекающему исторический материал для оживления изложения курса механики в средней школе. С этой целью подобраны сведения об изобретении различных приборов, широко распространенных в технике. Имена и даты, с которыми связаны эти изобретения, нередко остаются неизвестными учащимся, хотя и возбуждают их законную любознательность.

Круг вопросов книги не ограничен строго школьной программой. В ней уделено некоторое внимание механикам-практикам XIV—XV вв. — Брунеллески, Альберти, Мартини, не всегда упоминаемым в истории науки, хотя они оказали большое влияние на развитие механики. Более подробно, чем в курсах физики, рассмотрены исследования Гюйгенса; освещена проблема вращения твердого тела, лишь слегка затронутая в курсе физики средней школы; разъяснено понятие об инерционных силах и основанном на нем принципе Даламбера.

Знакомство с историей этих вопросов расширяет кругозор читателя и помогает ему понять некоторые явления, с которыми он встречается в своей практической деятельности.

Принятая в книге периодизация истории развития механики вытекает из материалистического понимания истории и определяется зависимостью развития науки и техники от роста производительных сил и характера производственных отношений. Более детальная разбивка материала диктуется внутренней логикой развития самой механики. Таким образом, избегается модернизация исторических фактов и идеалистическое толкование роли исследователей, с именами которых связаны открытия.

МЕХАНИКА РАБОВЛАДЕЛЬЧЕСКОГО ПЕРИОДА

1. ТЕХНИКА И МАТЕМАТИКА ДРЕВНЕГО МИРА

Как и другие отрасли естествознания, механика возникла и развивалась в тесной зависимости от потребностей общества и уровня производительных сил. С переходом от общинно-родового строя к рабовладельческому усилилось развитие ремесел, стали создаваться крупные мастерские, возводиться общественные здания, развернулись ирригационные работы, оживилась торговля. Судостроение, ирригация, строительство зданий требовали механизмов, действие которых и было предметом изучения механики.

Исследования в области механики с течением времени расширялись и углублялись, выходя иногда за пределы необходимых в данную эпоху практических потребностей. Полученные теоретические выводы и обобщения воздействовали, в свою очередь, на производство и способствовали его дальнейшему расширению и совершенствованию.

Техника[1] возникла на заре культуры человечества в странах древнего Востока, где за четыре тысячелетия до н. э. уже началось сооружение каменных зданий и развернулись ирригационные работы.

В долине Нила археологи обнаружили развалины громадных древних городов с остатками храмов, дворцов и грандиозными усыпальницами фараонов — пирамидами. В Месопотамии, между реками Тигром и Евфратом, обнаружены развалины громадных древних городов

[1] Техника есть совокупность отношений человека к природе в процессе производства, включая в это понятие не только средства (орудия) труда, но и процесс воздействия средств труда на предмет труда.

с остатками храмов, дворцов и других зданий. На месте Ниппура, религиозного центра одного из древнейших государств Месопотамии, раскопана покрытая наносами часть храма Бэла, свидетельствующая о высокой степени развития строительной техники. В развалинах города Эшнунны, расцвет которого относится к третьему тысячелетию до н. э., и столицы государства Мари, упоминавшейся в письменных памятниках XVIII в. до н. э., также найдены остатки больших дворцов, храмов и ступенчатых башен. Наконец, на месте древнего Вавилона, на берегу Евфрата, обнаружены развалины не только величественных храмов, но и прославленных в древности висячих садов вавилонских царей.

Храмы и дворцы в древней Месопотамии строились из кирпичей. Какой-либо механизации доставки или подъема строительных материалов не применялось. Об этом свидетельствуют найденные на стенах развалин храмов изображения рабочих, несущих кирпичи в корзинах.

Значительно бо́льшее значение для суждения о познаниях в технике народов древнего Востока имеют остатки сооружений в Египте. В этом рабовладельческом централизованном государстве имелись все условия, необходимые для возведения огромных сооружений.

Там строились царские усыпальницы — пирамиды, сложенные из огромных каменных плит или отесанных в виде параллелепипедов глыб. Например, ступенчатая пирамида фараона Хуфу высотой 146 *м* была возведена из каменных плит весом до 2,5 *Т*, а постройка при входе в эту усыпальницу — из отесанных глыб длиной до 5,5 *м* и весом до 42 *Т*. Воздвигались величественные храмы. В Фивах был построен храм богу Амону. Потолок его главного зала, площадью около 5 тысяч *кв. м*, поддерживался 134 массивными колоннами высотой от 14 до 24 *м*.

Эти сооружения не могли быть возведены без использования простых механизмов — рычагов, блоков и наклонных плоскостей.

Пирамиды сооружались ступенчатыми. Плиты поднимались рычагами со ступени на ступень, пока не достигали места укладки. Когда постройка заканчивалась, ступени закладывали и пирамида приобретала обычный вид.

Еще бо́льшие трудности представляла установка обелисков — колонн высотой до 30—40 *м* и весом до 300—400 *Т*. Они высекались в горах из массивов скал и доставлялись к храмам и городам Египта волоком или на катках.

Трудно представить себе, как справлялись тогда с доставкой и установкой обелисков — ведь это нелегкая задача даже для современной техники! Правда, в распоряжении египетских строителей были армии бесплатных рабочих — рабов. Но, чтобы использовать эту рабочую силу для поднятия обелисков, нужны были хотя бы простые механические приспособления.

Некоторый свет проливает на этот вопрос находка в египетских развалинах рисунков, изображающих установку обелиска. Чтобы установить обелиск, его будущий фундамент окружали высокой каменной стеной, а образовавшийся колодец заполняли сухим песком. Рядом устраивали высокую земляную насыпь и по ее пологому склону втаскивали наверх обелиск основанием вперед.

Когда основание колонны достигало колодца и сползало в него, внизу, у самого фундамента, через оставленный в стене проход начинали выбирать песок. Опираясь на поверхность песка в колодце, обелиск постепенно опускался и, наконец, устанавливался на фундаменте. Затем насыпь раскапывали лопатами, стену разбирали, а глину, камни и щебень уносили в корзинах или, может быть, увозили в телегах.

Тяжелые грузы перевозились древними египтянами на судах. На стенах одного из храмов сохранилось изображение кораблей морского флота, отправленного в Азию для доставки рабов, а также оливкового масла и других товаров.

Суда, изображенные на барельефах, имели высоко поднятые нос и корму, служившие местом для погрузки товаров. Гребцы же сидели в средней, низкой, части судна. При таком устройстве под тяжестью грузов судно должно было выгибаться серединой кверху, и ему угрожала опасность перелома в средней части.

Египетские техники нашли способ предотвратить эту катастрофу, связывая нос и корму сплетенным из женских волос туго натянутым канатом. Канат подпирался стоявшими на палубе деревянными брусьями.

Обелиски перевозились на подобных же судах. Они перетаскивались с берега по сплошным настилам из толстых досок, поливавшихся маслом, и укладывались по две на каждую барку основаниями друг к другу.

Основания обелисков были значительно массивней, чем их вершины, и под давлением огромной тяжести барка могла посередине переломиться. Египетские техники устранили и эту опасность, установив на судне прочную арку из деревянных брусьев, упиравшуюся пятами в нос и корму, и подвешивая к ней обелиски. При этом давление груза передавалось на нос и корму барки.

Это приспособление — шпренгель — было потом забыто, а через 3500 лет американские инженеры вновь «изобрели» его для предохранения слабого корпуса плоскодонных судов.

Египетские суда двигались при помощи весел, которые пропускались через железные кольца, укрепленные на бортах.

Применяя различного рода рычаги и блоки, древние египтяне и вавилоняне имели уже достаточный технический опыт для вывода основных принципов статики, но ни в египетских папирусах, ни в записях на глиняных табличках вавилонских библиотек не осталось какихлибо указаний на знание этими древними народами законов механики.

Более точны и детальны сведения о достижениях вавилонян и египтян в области математики. Древние народы Месопотамии обладали значительными математическими познаниями, возникшими также из потребностей практики.

Ф. Энгельс писал, что, «как и все другие науки, математика возникла из практических нужд людей: из измерения площадей земельных участков и вместимости сосудов, из счисления времени и из механики. Но, как и во всех других областях мышления, законы, абстрагированные от реального мира, на известной ступени развития отрываются от реального мира, противопоставляются ему как нечто самостоятельное, как явившиеся извне законы, с которыми мир должен сообразоваться»[1].

Греческий историк V в. до н. э. Геродот писал, что разливы Нила постоянно смывали знаки, указывавшие границы между земельными участками. Приходилось

---

[1] Ф. Энгельс, Анти-Дюринг, Госполитиздат, 1948, стр. 37.

ежегодно их восстанавливать. Так возникла геодезия, служащая для измерений линий и углов между ними на земной поверхности, а из практики землемерия — геометрия (геометрия буквально означает землемерие). Эта наука получила еще большее развитие с началом сооружения больших зданий, контуры которых определялись на строительной площадке при помощи кольев и натянутых между ними веревок.

У древних вавилонян получила значительное развитие арифметика. Расшифровка клинообразных письмен показала, что, кроме десятеричной системы счисления, была распространена и шестидесятеричная система, воспоминанием о которой осталось деление окружности на 360 частей. В развалинах Ниппура было найдено много глиняных табличек, покрытых клинообразными письменами, изучение которых доказало, что вавилонянам II тысячелетия до н. э. были известны возведение в степень, извлечение квадратного и кубического корня, трисекция прямого угла и деление окружности на шесть частей.

Значительными математическими познаниями обладали и древние египтяне. Об этом свидетельствует так называемый «Риндский папирус», относимый к началу II тысячелетия до н. э. Он представляет собой математическое руководство к решению арифметических и геометрических задач. Как указывает его автор, при составлении своего сочинения он руководствовался более древними рукописями. Следовательно, математические знания в Египте возникли в еще более древнее время. Автор этого папируса уже знал дроби, арифметическую и геометрическую прогрессии, решение уравнений первой степени, имел понятие о квадратных корнях и оперировал отвлеченными числами.

В целях поддержания своего авторитета, египетские жрецы облекали в таинственную форму геометрические построения и арифметические расчеты, например Риндский папирус был озаглавлен «Руководство к достижению познания всех темных вещей и тайн, содержащихся в предметах».

Другим замечательным памятником арифметических и геометрических знаний древних египтян является «Московский папирус», хранящийся в Москве.

Современниками народов древнего Востока были обитатели острова Крита, построившие своеобразные сооружения, состоявшие из парадных и жилых комнат, мастерских, складов и других помещений. Эти сооружения были снабжены водопроводом и канализацией. Критская культура, расцвет которой относится примерно к середине II тысячелетия до н. э., стала распространяться тогда же на Балканском полуострове и Эгейском побережье Малой Азии. Так возникла крито-микенская культура, материальные памятники которой найдены при раскопках в Микенах, Тиринфе и других местах Пелопоннеса, а в Малой Азии — на месте древней Трои (Илион).

Носители этой культуры находились в постоянных торговых и дипломатических отношениях с Вавилоном и Египтом. Как доказывают оставшиеся от них сооружения, например «Львиные ворота» в Микенах, они были знакомы со способами передвижения и подъема на большую высоту каменных глыб весом до 125 *Т*.

Крито-микенская культура была разрушена надвинувшимися с севера греческими племенами. Позднее греки, вероятно, воспользовались техническими познаниями покоренных ими микенцев. Период крито-микенской культуры сменился новым, сведения о котором сохранились в поэмах Гомера «Илиада» и «Одиссея». Создание этих поэм относится к VIII—VI вв. до н. э.— периоду разложения первобытнообщинного строя и зарождения в древнегреческом обществе рабовладельческих отношений.

Несомненно, что в этот период греки уже пользовались некоторыми техническими приспособлениями и машинами. Но владельцы рабовладельческих мастерских не стремились облегчить труд своих рабочих. От жестоко эксплуатировавшихся рабов, естественно, нельзя было ожидать бережного отношения к механизмам.

Характеризуя условия труда в античный период, можно сказать, что своеобразным экономическим принципом производства того времени было применение только наиболее грубых, наиболее неуклюжих орудий труда, которые как раз вследствие своей грубости и неуклюжести трудно подвергаются порче.

Поэтому, хотя и были достигнуты значительные успехи в конструировании военных машин и подъемных устройств, в мастерских господствовал исключительно ручной труд. Но было бы ошибочным утверждать, будто в Греции и Римском государстве технические приспособления вообще не использовались. Рудники, выплавка металлов и металлообработка представляли собой достаточно широкую область их применения. В мукомольном производстве от примитивной «зернотерки» техника эволюционировала до создания водяной мельницы. Даже в сельском хозяйстве были попытки механизации труда, доказательством чего служит римская «жнейка».

Особенно больших успехов достигли античные техники в построении подъемных и военных метательных машин.

Для поднятия балок и других тяжестей применялись подвижные блоки и полиспасты на наклонно установленных деревянных бревнах. Вот как описывал эти «краны» римский инженер-ученый *Витрувий* в сочинении «Десять книг об архитектуре», написанном в последние десятилетия до н. э.

«Берутся две балки величины, соответствующей для подъема тяжести, ставятся отвесно и таким образом, что в верхней (головной) своей части они скрепляются болтом, а внизу расходятся врозь. В этом отвесном положении они удерживаются благодаря канатам, которые, будучи продеты в головную часть балок, растянуты в стороны по бокам. В самом верху привязывается составной блок. В составной блок вставлены ролики, вращающиеся на своих маленьких осях. Через верхний ролик продевается канат, предназначенный для подъема тяжести; затем этот канат опускается вниз и продевается вокруг ролика нижнего блока. Потом канат снова поднимается и проводится вокруг нижнего ролика верхнего блока. После этого канат снова опускается к нижнему блоку, и конец его приспосабливается к кольцу этого блока. Другой же конец каната проводится вниз» [1].

Таков был «трехходовый» римский подъемный кран с двумя неподвижными и одним подвижным блоком.

Для поднятия очень больших тяжестей применялись краны иной конструкции. На вал ворота насаживался барабан; на него наматывался канат, конец которого шел

---

[1] Описание крана в сочинении Витрувия понятно при замене слов «составной блок» словом «обойма», а слова «ролик» — словом «блок».

к вороту с вертикальным валом («кабестан»). Конец каната от блоков, на которых висел груз, наматывался на вал горизонтального ворота. При вращении рычага кабестана груз поднимался очень медленно, но зато выигрыш в силе был бо́льшим, чем у первого подъемного крана.

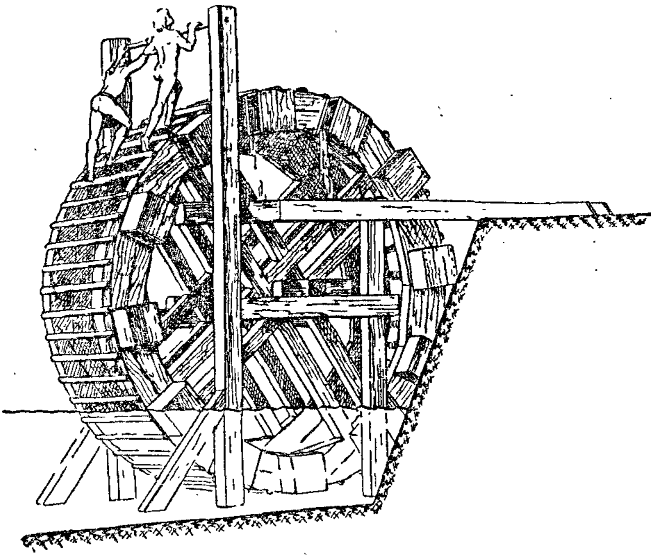

Рис. 1. Античное водочерпальное колесо.

Подъемные краны применялись римлянами также при нагрузке и разгрузке судов. В этом случае кран устанавливался на поворотном круге.

Для подъема воды и орошения земель устраивались водяные колеса с черпаками (рис. 1). Часть колеса погружалась в воду. На обод набивались ступеньки. Люди переступали с одной ступени на другую и таким образом поворачивали колесо. Черпаки захватывали воду и, опрокидываясь наверху, выливали ее в распределительный желоб.

В античную эпоху уже производилась откачка воды из рудников.

«Иногда,— писал историк Диодор Сицилийский,— в зависимости от глубины их (рудников), натыкаются на реки, текущие под землей; их напор парализуют тем, что пресекают течение рек, отводя их в боковые подземные ходы... Вычерпываются водные потоки так называемыми «египетскими улитками», которые изобрел Архимед Сиракузянин, когда он прибыл в Египет. Благодаря тому, что «улитки» беспрерывно подают воду до входа в рудники, последние высушиваются и становятся пригодными для производства работы» (рис. 2).

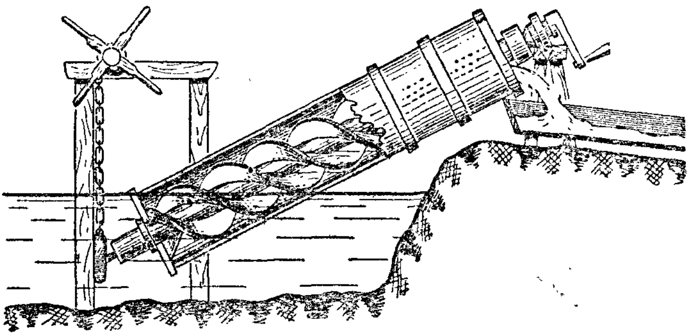

Рис. 2. Архимедов винт.

Римляне сделали первую попытку использовать силу течения реки в качестве двигателя. Они устанавливали водяные колеса с лопатками на реках. Ударяя в лопатки, вода вращала колеса. Их вращение передавалось с помощью зубчатых колес жерновам мельницы (рис. 3).

Военные техники придумали стенобитную машину — таран. Это — тяжелое бревно, оканчивающееся бронзовой бараньей головой или конусообразным наконечником. Таран подвешивался на канатах под крышей, предохранявшей людей и машину от камней, которые сбрасывались со стены осажденными. Раскачиваемое воинами бревно наносило удары в стену, постепенно расшатывая камни, пока, наконец, не пробивало в ней брешь. Через пролом, прикрываясь щитами, воины врывались в крепость.

Для поражения удаленных целей были изобретены метательные машины, бросавшие на большое расстояние каменные ядра. В них использовалась сила упругости закручиваемых воловьих сухожилий. Наиболее простой метательной машиной был «онагр» (громадная праща).

На основании описаний удалось установить, каково было его устройство (рис. 4). Между брусьями очень прочной деревянной рамы натягивался пучок воловьих

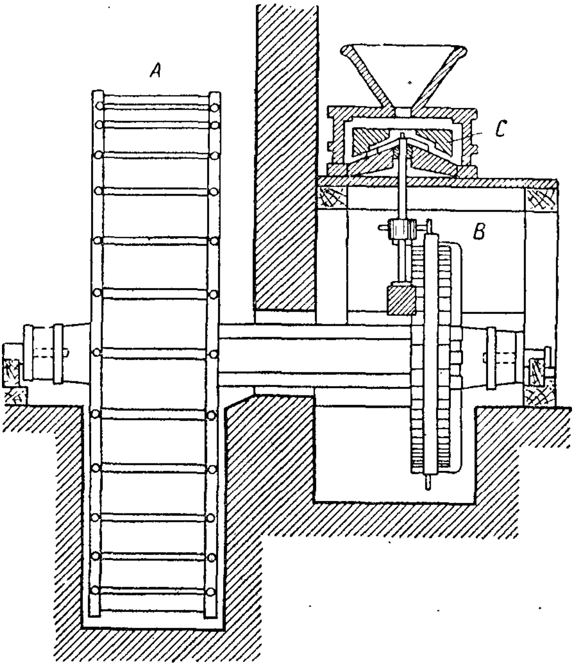

Рис. 3. Римская водяная мельница.

жил, который мог быть закручен при помощи ворота. В пучок вставлялся рычаг, имеющий на конце ременную петлю пращи с заложенным в ней каменным ядром. При закручивании пучка жил рычаг отклонялся назад, в противоположную сторону от цели обстрела. В таком положении он удерживался специальной шпонкой, которая в нужный момент вышибалась ударом молотка. Освобожденный рычаг под действием мгновенно раскручивающихся жил делал резкий взмах и ударял о поставленный на раме упор. Камень же по инерции летел в цель.

Сложнее была устроена катапульта, метавшая копья. Эта машина представляла собой подобие мощного лука. Концы двух горизонтально расположенных рычагов зажимались между вертикальными пучками воловьих жил. Два других конца соединялись при помощи ворота, причем пучки жил закручивались. Когда удерживающая тетиву задвижка вышибалась, заложенное в машину копье выбрасывалось по направляющему желобу в цель.

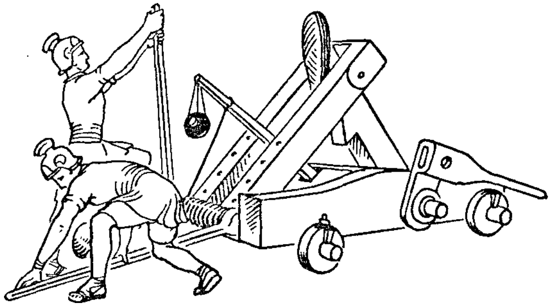

Рис. 4. Метательная машина — онагр.

Из сказанного следует, что античные техники обладали огромным запасом наблюдений, требовавшим обобщения. К решению этой задачи приступили греческие философы.

2. МЕХАНИКА НАТУРФИЛОСОФОВ

Греческие мыслители не были сами инженерами-строителями храмов и дворцов, конструкторами машин или водителями торговых судов. Перед ними непосредственно не возникали задачи техники. Как члены правящего класса рабовладельческого общества, философы презирали труд. Они пренебрегали опытами, имевшими внешнее сходство с занятием ремеслами. Поэтому, даже не отрицая значения опыта для познания природы, они не занимались экспериментированием в современном смысле этого слова.

К истории современной механики прямое отношение имеют исследования древними греками механического движения, или перемещения тел. Однако и в этих исследованиях некоторые натурфилософы основывались не на данных опыта или наблюдений, а на чисто умозрительных положениях. Таковы, например, рассуждения о движении философа элейской школы Зенона (V в. до н. э.).

Зенон, возражая атомистам и защищая положение о единстве и непрерывности мира, выступил со своими известными парадоксами — «апориями», доказывая неделимость пространства и времени. Он утверждал, например, будто бы быстроногий Ахиллес никогда не сможет догнать черепаху: пока Ахиллес пробежит расстояние, отделяющее его от черепахи, она проползет немного вперед; за промежуток времени, необходимый Ахиллесу, чтобы пробежать и это расстояние, черепаха еще продвинется немного, и так далее, до бесконечности. Или: «летящая стрела покоится»; в каждой точке своего пути стрела находится в покое, а из ряда состояний покоя не может возникнуть движение.

Рассуждения Зенона возбудили большой интерес у философов и математиков. Одни противники Зенона, как Диоген, отрицали его вывод, обращаясь к опыту. Другие, как Демокрит и Аристотель, обращались к понятию о бесконечно малых величинах.

Демокрит (460—370 гг. до н. э.), основатель атомизма в античной физике, утверждал, что отрезок пути, который должен быть пройден до пункта, где Ахиллес догонит черепаху, состоит из бесконечно большого количества бесконечно малых элементов. Соответственно и необходимое для этого время состоит из бесконечно малых промежутков. Поэтому бесконечно большое количество элементов пространства должно быть исчерпано в бесконечно большое количество промежутков времени.

Подобным же образом рассуждал и *Аристотель,* считая, что хотя пространство и время не состоят в действительности из бесконечно малых и более неделимых элементов, но они делимы на бесконечно малые части в потенции.

«Апория» об Ахиллесе и черепахе легко разрешается математически, если ввести понятие о скорости движения. Следуя за логическим рассуждением Зенона, переведем его на математический язык.

Пусть Ахиллес находится на расстоянии l от черепахи и бежит со скоростью v, а черепаха ползет со скоростью v_1. Пока Ахиллес в течение промежутка времени $t_1=\frac{l}{v}$ пробежит отделяющее его от черепахи расстояние, последняя проползет путь, равный $v_1 t_1 = \frac{l}{v} v_1$. Это расстояние Ахиллес пробежит за время $t_2 = \frac{l}{v^2} v_1$, а черепаха успеет проползти еще путь $t_2 v_1 = \frac{l v_1^2}{v^2}$, и так далее. Сложив все промежутки времени $t_1 + t_2 + t_3 + \ldots$, мы получим время, в течение которого Ахиллес догонит черепаху:

$$\frac{l}{v} + \frac{l v_1}{v^2} + \frac{l v_1^2}{v^3} + \ldots =$$

$$= \frac{l}{v}\left(1 + \frac{v_1}{v} + \frac{v_1^2}{v^2} + \ldots\right).$$

Так как $\frac{v_1}{v}$ меньше единицы, то ряд, стоящий в скобках, сходящийся. Он представляет собой геометрическую прогрессию, сумма членов которой равна

$$\frac{1}{1 - \frac{v_1}{v}} = \frac{v}{v - v_1}.$$

Время, в течение которого Ахиллес догонит черепаху, равно

$$\frac{l}{v} \cdot \frac{v}{v - v_1} = \frac{l}{v - v_1}.$$

Значение «апорий» Зенона в истории науки определяется тем, что этот философ ввел впервые понятие о бесконечности, играющее важную роль в современной математике.

Наиболее полно философская наука о механическом движении тел в античное время была развита *Аристотелем* (384—322 гг. до н. э.) в его «Физике». Эта работа состоит из восьми книг (глав). В первых двух книгах изложены воззрения Аристотеля на природу вещей. В третьей дано определение движения. Четвертая посвящена движению брошенных тел. В остальных книгах рассмотрены разные виды движения, понимаемого как количественные и качественные изменения (в том числе и перемещения) тел. В «Физике» Аристотель в первую очередь пытался найти «начала», которые могли бы лечь в основу логических выводов. Он установил, что началами при изучении природы являются материя и форма. И физика изучает материю, форму, причину движения и конечную цель явлений.

Не вдаваясь в подробное рассмотрение натурфилософских построений Аристотеля, остановимся лишь на некоторых из них, имеющих отношение к современной механике, а именно на его идеях о материи, пространстве, времени и механическом движении.

Физики античного времени в вопросе о строении материи принадлежали к сторонникам двух диаметрально противоположных воззрений.

В V—IV вв. до н. э. *Левкиппом и его учеником* Демокритом была выдвинута концепция о дискретности (расчлененности) вещества. По учению этих философов, материя (так они называли вещество) делима не бесконечно. Пределом делимости является мельчайшая частица — а т о м, т. е. «неделимый». Между атомами материи — пустота, обусловливающая возможность их перемещения (движения).

Атомистическое воззрение древнегреческих философов на строение материи возникло в результате наблюдений испарения воды, растворения в жидкости красок, распространения в воздухе запахов и тому подобных явлений, легко объяснимых с точки зрения атомного строения вещества.

Аристотель был противником этого учения. По его мнению, материя сплошь заполняет все пространство, за которым он признавал физическую реальность.

«Можно принять,— писал Аристотель,— что место представляет собою нечто наряду с телами и что всякое чувственно воспринимаемое тело находится в месте», и далее: «по-видимому место есть нечто вроде сосуда, так как сосуд есть переносимое место, сам же он не имеет ничего общего с содержащимся в нем предметом. Поскольку место отделимо от предмета, постольку оно не есть форма, поскольку же объемлет его, оно отличается от материи» [1].

Существование пространства — необходимое условие возможности движения: «движение невозможно без места, пустоты и времени».

---

[1] А р и с т о т е л ь, Физика, Госиздат, 1937.

Возможность механического движения тел в сплошь заполненном пространстве Аристотель объяснял тем, что при перемещении «тела могут уступать друг другу место, одновременно при отсутствии какого-либо отдельного протяжения (пустоты. — *Б.* и *М.*) между ними. Это очевидно в вихревых движениях сплошных тел и в движениях жидкостей». Он даже отрицал самую возможность перемещения тел в пустом пространстве, потому что движение познается по изменению положения одного тела относительно другого, а в пустоте, где нет других тел, невозможно установить факт движения.

Понятие о времени Аристотель ставил в тесную связь с движением материальных тел. «Время,— писал он,— есть не что иное, как число движения по отношению к предыдущему и последующему. Таким образом время не есть движение, а является им постольку, поскольку движение имеет число... Мы не только измеряем движение временем, но и время движением, вследствие их взаимного определения».

Однако и само движение было весьма сложным понятием у греческих философов. Аристотель понимал под этим словом процесс «возникновения тела», которое принимает определенную форму из материи, представляющей собой только «возможность» его возникновения. Так как подобное «движение» включает не только количественные, но и качественные изменения, то Аристотель подчеркивал, что для измерения времени удобно лишь движение светил: «Равномерное круговое движение,— писал он,— является мерой по преимуществу, так как число его является самым известным. Ни качественное изменение, ни рост, ни возникновение не равномерны, а только перемещение. Оттого и время кажется движением сферы, что этим движением измеряются прочие движения и время измеряется им же».

Установив понятия пространства и времени, Аристотель исследовал различные движения. При этом он исходил из философских определений и делал выводы методом формальной логики.

Рассматривая вопрос о механическом движении, он сделал попытку вывода количественных соотношений между «движущим» (силой), временем и пройденным путем.

В VII книге своей «Физики» 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 λ, а на целое λ 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».

По мнению философа, путь, пройденный телом под влиянием силы, пропорционален времени, а не квадрату времени, как это наблюдается в действительности. Ошибка заключается в том, что постоянная сила будто бы сообщает телу равномерное движение.

Подобные рассуждения, не основанные на измерениях и экспериментах, не могли лечь в основу динамики.

Для создания динамики Аристотелю не хватало также знания принципа инерции движущихся тел (инерция покоящегося тела была ему известна). Исходя из поверхностного наблюдения над повозкой, немедленно прекращающей движение, как только остановится лошадь, он пришел к ложному заключению, будто бы для поддержания равномерного движения необходимо постоянное действие силы.

Как далек был Аристотель от представления о принципе инерции современной механики, показывает следующее его рассуждение: «Однако не следует думать, что если α продвигает тело β на величину λ 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 λ, 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».

Незнание принципа инерции нельзя объяснить только тем, что философы не наблюдали механических явлений. Явления, свидетельствующие о существовании инерции движения, знакомы из повседневного жизненного опыта: движение по инерции брошенного камня, подплывающей к берегу лодки в стоячей воде, когда подняты весла, и тому подобные явления были известны всем.

Вместо того чтобы сравнить условия, в которых движутся брошенный камень и катящаяся по дороге повозка, и учесть разницу в трении, испытываемом камнем и повозкой, Аристотель придумывал причины, поддерживающие движение брошенного камня. По его мнению, в пустоту, образующуюся позади камня, врывается воздух и подталкивает его вперед.

Стремление «объяснить» явления природы, исходя из умозрительных предпосылок, а не выводить законы природы из наблюдений, было причиной грубейшей ошибки Аристотеля в его воззрении на свободное падение тел.

Аристотель утверждал, будто скорость свободного падения пропорциональна весу тела. Это положение опровергалось повседневными наблюдениями строителей и техников и поставило в затруднительное положение аристотелианцев. Сторонникам Аристотеля, не осмеливавшимся критически отнестись к его учению о природе, пришлось впоследствии отрицать очевидные факты и тем самым подрывать авторитет этого философа.

На механику Аристотеля оказали большое влияние его космологические воззрения. Земля, по его представлению, абсолютно неподвижна и находится в центре Вселенной. Поэтому движения других тел относительно нее имеют абсолютный характер.

Падение на земную поверхность тяжелых тел и поднятие вертикально вверх пламени огня Аристотель называл «естественными», а все другие движения земных предметов — «насильственными». Круговое (суточное) движение небесных светил он считал «совершенным», так как оно вечно и равномерно. В противоположность им движения тел в «подлунном» мире «несовершенны».

Классификация движений, введенная в науку Аристотелем, очень задержала развитие механики в средние века. Особенно же большим недостатком воззрений того времени было незнание принципа инерции и уверенность, что движение тела возможно только при постоянном воздействии на него силы.

Оценивая значение «Физики» Аристотеля в развитии современной механики, академик А. Н. Крылов писал: «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, а значит, и на свидетельстве чувств и измерениях с неизбежными в них погрешностями, так же мало удовлетворяли бы склонности ума древних греков к точным отвлеченным рассуждениям, как эти рассуждения, представляющиеся нам во многом не относящимися к естествознанию, мало удовлетворяют нас»[1].

С точки зрения современной механики законы движения, как явления природы, зависящие от массы тела и действующих на него сил, не могут быть познаны без наблюдения и экспериментального исследования; философы же древней Греции ограничивались эмпирическим методом и умозрением.

В трудах Аристотеля не найдено решения проблемы рычага, занимавшей мыслителей античного времени. Только в сочинении «Проблемы механики», принадлежащем одному из его учеников, изложена эта задача, рассматриваемая с своеобразной точки зрения[2]. Древние философы обладали достаточными математическими познаниями, чтобы установить количественные соотношения между величинами грузов и длинами плеч рычага. Но их интересовала не наблюдаемая закономерность, а причина уравновешивания малым грузом большого. Автор «Проблем механики» хотел видеть причину этого явления в «загадочных» свойствах круга, дуги которого описывают концы рычага при нарушении равновесия.

Не нужно забывать, что простая зависимость между длинами плеч рычага и уравновешивающимися на нем грузами была из практики известна древним техникам. В III—II вв. до н. э. у римлян уже получил широкое распространение безмен, пользование которым совершенно невозможно без знания закона рычага. Свойство рычага,

---

[1] А. Н. Крылов, Галилей как основатель механики. Сб. «Галилео Галилей», изд. АН СССР, 1943, стр. 59—60.

[2] Это сочинение было переведено с греческого языка и издано в 1829 г. под заглавием «Aristoteles Mechanische Probleme», von F. Poselger.

конечно, было известно, как это следует из его слов, и автору «Проблем механики».

«В рычаге соединяются три точки — опоры, подвеса и центр — и два груза — движущий и движимый. Но движимый и движущий грузы находятся в обратном отношении их расстояний (от центра): и всегда движение происходит тем легче, чем дальше от центра расположен движущий груз; причина этому, как уже отмечено, та, что больший радиус описывает и больший круг...» «Ни одна из точек линии, описывающей круг, не обладает той же скоростью, как какая-либо другая, и обладает тем большей скоростью, чем дальше она лежит от конечной неподвижной точки прямой» (центра окружности).

Приведенные высказывания уже позволяют вывести знаменитое «золотое правило» механики, сформулированное только в I в. до н. э. Героном: сколько выигрывается в силе, столько же теряется в скорости. Зная же соотношение между приложенной силой и скоростью, можно было бы установить и равенство работ, совершаемых силами.

Но древние философы не имели ясного представления о работе и не могли сделать вывода, в котором заключалось бы объяснение выигрыша в силе, получаемого при пользовании рычагом и другими простыми механизмами.

В области кинематики Аристотелю удалось установить принцип сложения движений. Вывод этого принципа, изложенный в «Проблемах механики», был основан на кинематических соображениях и сопровождался чертежом.

Аристотель вывел правило сложения движений чисто геометрически, хотя, вероятно, на эту мысль его навело наблюдение за движением лодок, пересекающих реку поперек течения.

Его рассуждение сводится к тому, что если точка A (рис. 5) совершает движение по прямой AC, то она движется одновременно по отношению к AB и AD, проходя расстояния, пропорциональные этим отрезкам, причем AC есть диагональ построенного на них параллелограмма.

В том же сочинении дано плодотворное положение о том, что движение по окружности (а следовательно, и вообще по кривой линии) можно представить себе как сложное движение, происходящее по двум направлениям: по касательной к окружности и по радиусу к центру кривой. Складывая эти движения для каждого весьма короткого промежутка времени по правилу параллелограмма, получим движение по ломаной линии, тем более приближающейся к круговой траектории, чем короче промежуток времени. В пределе, когда интервалы времени превращаются в бесконечно короткие мгновения, ломаная линия совпадает с кривой.

Введение в механику принципа сложения движений было большой заслугой Аристотеля. Этот кинематический принцип указал путь и к решению проблемы сложения сил. Он лег в основу исследований траектории брошенного тела Тартальей и Галилеем. Можно согласиться с французским физиком П. Дюгемом, что в высказываниях Аристотеля о рычаге заключается в неявной форме начало возможных перемещений. Однако едва ли не преувеличением является мнение этого физика, что «... если бы Аристотель сформулировал только одну эту мысль, то и тогда его надлежало бы прославлять как отца рациональной механики» [1].

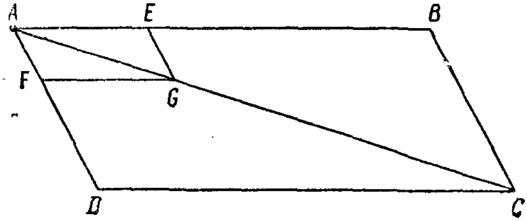

Рис. 5. Сложение движений по Аристотелю.

Идеи механики, заключавшиеся в трудах Аристотеля, не получили развития у его ближайших последователей. Причиной этого была, по-видимому, неясность их выражения и затруднительность применения к решению задач техники.

«Аристотелем, — говорит историк физики Ф. Розенбергер, — заканчивается творческий период греческой натурфилософии. Его законченная, замкнутая в себе система давала ученикам мало исходных точек для даль-

[1] P. Duchem, Les origines de la statique, Paris, 1905, стр. 8.

нейшего развития. Кроме того, учитель настолько превосходил учеников силою своего ума, что последние были рады усвоить себе и уяснить другим его учение, не имея ни времени, ни, в особенности, смелости исправлять учителя»[1].

Только с развитием машиностроения в Греции и Риме, когда понадобились расчеты подъемных кранов и других механизмов, и с развитием математики в работах Архимеда удалось не только решить ряд задач статики, но и установить некоторые ее принципы.

3. ВОЗНИКНОВЕНИЕ СТАТИКИ

С IV в. до н. э. в Греции началось быстрое развитие техники судостроения, строительства зданий и военного дела. Широко применялись подъемные краны и водочерпальные колеса. При осаде городов для разрушения стен строились стенобитные машины, в войсках были введены баллисты для метания каменных ядер, катапульты, выбрасывавшие большое число копий и стрел, и другие военные машины.

Развивавшиеся производство и торговля предъявляли все бо́льшие требования к машиностроению. От ученых техники ждали теории механизмов.

Основы механики, необходимой для расчета механизмов, были заложены греческим математиком *Архимедом* (287—212 гг. до н. э.).

Во время пребывания в Александрии Архимед проявил большой интерес к технике. В Египте огромную роль для страны играло орошение полей. Архимед изобрел водоподъемный механизм — «архимедов винт» (см. рис. 2), нашедший широкое применение для поливки.

Древние писатели не вполне справедливо утверждали, будто Архимед относился с пренебрежением к вопросам практики. Например, римский историк Плутарх, живший двумя столетиями позднее Архимеда, характеризуя знаменитого греческого математика, писал, что построение машин и искусство, направленное на удовлетворение житейских потребностей, были в его глазах чем-то неблагородным, низкоремесленным. В доказательство правильности этого взгляда Плутарх приводил то обстоя-

[1] Ф. Розенбергер, История физики, т. I, ОНТИ, 1933, стр. 28.

тельство, что Архимед не оставил описания своих технических изобретений.

Однако в древности были широко известны многочисленные изобретения, сделанные Архимедом по возвращении в родной город Сиракузы. Рассказывали, что Архимед построил машину, при помощи которой вытащил на берег тяжело нагруженное судно. Вероятно, этот механизм представлял собой систему шестерен, вращаемую бесконечным винтом, или же, может быть, Архимед применил для этого дифференциальный блок.

В эпоху, когда жил Архимед, между римлянами и карфагенянами шла борьба за обладание средиземноморским побережьем. Сицилия находилась тогда в сфере влияния Карфагена. На этом острове было несколько небольших греческих городов и в их числе — Сиракузы. Ожидая нападения римлян, царь этого города поручил Архимеду построить военные машины для защиты.

Рим направил в Сицилию войска под предводительством своего опытного полководца Аппия Клавдия и флот, которым командовал Марцелл. Однако римляне сразу встретили жестокий отпор, так как греки построили невиданные до того военные механизмы, частью изобретенные, частью усовершенствованные Архимедом.

В течение двух лет закаленные в войнах римские войска не могли взять Сиракузы. Только воспользовавшись небрежностью защитников города, они проникли в него. Рассказывают, будто Архимед так увлекся решением какой-то геометрической задачи, что не заметил вторжения римских воинов в город и был убит одним из них.

Архимед, искусный инженер и изобретатель, оставил о себе память как о великом математике и основателе статики. Его деятельность протекала в эпоху, получившую в науке название александрийской, потому что она была связана с работами ученых академии Александрии.

В I в. до н. э. в книгохранилище Александрийской библиотеки находилось более полумиллиона оригинальных рукописей, которые были собраны из разных стран. К каждому сочинению составлялся комментарий. Хранителями библиотеки обычно были выдающиеся ученые. Александрийская академия с III в. до н. э. и до начала средневековья была главнейшим научным центром древнего культурного мира. В ней начал научную деятельность и Архимед.

Греческие ученые обладали достаточными математическими познаниями, чтобы ставить и разрешать простейшие проблемы статики. Эти знания наиболее полно и совершенно были изложены в «Началах» Евклида (конец IV и начало III в. до н. э.), приведшего их в строгую систему. Дальнейшее развитие математика получила в трудах Архимеда, Аполлония и других ученых александрийского периода.

Видную роль в истории механики сыграли работы *Аполлония* (около 200 г. до н. э.). Из восьми книг его сочинения о конических сечениях в оригинале сохранились первые четыре, пятая, шестая и седьмая — в арабском переводе, восьмая потеряна.

Аполлоний установил главнейшие свойства эллипса, параболы и гиперболы, знание которых столь необходимо для изучения движения космических тел под действием взаимного тяготения.

Архимед широко применял метод исчерпывания. Для определения площади фигуры, ограниченной кривой линией, он вписывал в нем многоугольники, постепенно увеличивая число их сторон. При этом площадь многоугольника приближалась к площади фигуры.

В сочинении «Метод» Архимед уже пользовался, по мнению историков математики, методом, по существу соответствовавшим интегрированию. Только, не желая говорить о бесконечно малых величинах, понятие о которых еще не получило признания в то время, Архимед строил выводы путем исчерпывания.

Пользуясь этим методом, Архимед вычислил отношение длины окружности к диаметру с точностью до третьего десятичного знака, определил площадь эллипса, сегмента параболы, исследовал свойства спирали, выходя далеко за пределы элементарной геометрии. Математические исследования Архимеда имели важное значение для развития механики.

В механику Архимед ввел понятие центра тяжести. В сочинениях «О равновесии плоскостей» он указал на способы отыскания этой замечательной точки у различных геометрических плоских фигур, причем не только у многоугольников, что сделать очень просто, но и у фигур, ограниченных кривой линией, например параболой.

Так как машины древних греков и римлян состояли из рычагов, блоков, воротов, клиньев и бесконечных винтов, то конструкторам и изобретателям было необходимо знание условий равновесия сил, приложенных к этим простым механизмам.

Главнейшей проблемой статики того времени был закон рычага, изложенный еще в «Проблемах механики» Аристотеля. Архимед впервые дал вывод этого закона, исходя из своего учения о центре тяжести. Он положил в основу рассуждений несколько «аксиом», главнейшие из которых сводятся к следующему:

1) равные веса, действуя на равных расстояниях от точки опоры невесомого стержня, уравновешиваются;

2) при неравных весах, действующих на равных расстояниях от точки опоры невесомого стержня, перевешивает бо́льший;

3) из равных весов, действующих на неравных расстояниях, перевешивает отдаленный;

4) действие одного груза может быть заменено действием нескольких равномерно распределенных так, что центр их тяжести сохраняет неизменное положение. Обратно — несколько равномерно распределенных грузов можно заменить одним, подвешенным в их центре тяжести.

Первая из этих аксиом, исходя из закона причинности, может быть принята как безусловная истина: нет причин, в силу которых один из равных грузов, находящихся на равных расстояниях от точки опоры рычага, мог бы перевесить другой.

Эта аксиома не возбуждала сомнений у механиков. По поводу нее известный механик XVIII в. Жозеф Лагранж писал: «Что прямой горизонтальный рычаг, концы которого нагружены равными грузами и точка опоры которого находится посередине, остается в равновесии, это само по себе очевидно, так как нельзя усмотреть основания, в силу которого один груз перетянул бы другой» [1].

Пользуясь первой аксиомой, легко убедиться в справедливости и второго допущения. Большой груз можно рассматривать как состоящий из двух: равного по весу

---

[1] Ж. Лагранж, Аналитическая механика, т. 1, Гостехиздат, 1950, стр. 20.

висящему на противоположном конце рычага и некоторого добавочного груза. Поскольку равные грузы уравновешивают друг друга, добавочный груз должен заставить опуститься плечо рычага.

Третья аксиома, даже считая невесомыми плечи рычага, не очевидна. Только опыт указывает на значение относительной длины плеч рычага для его равновесия. Взвешивание на безмене сделало в то время этот опыт повседневным.

Наконец, четвертая аксиома представляет собой опытный факт и одновременно теорему из учения о цен-

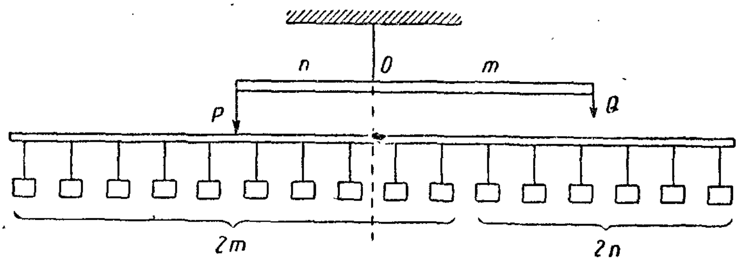

Рис. 6. К доказательству закона рычага.

тре тяжести тел. По поводу этого положения, сравнивая его с первой аксиомой, Лагранж писал: «Не так, однако, обстоит с допущением, что нагрузка на точку опоры равна сумме обоих грузов. По-видимому, все механики рассматривали это допущение как результат повседневного наблюдения, которое учит нас, что тяжесть тела зависит только от его массы, но ни в какой мере не зависит от его формы»[1].

Таким образом, доказательство принципа рычага было построено Архимедом частью на формально-логических, частью на опытных положениях.

Архимед рассуждал так: пусть по всей длине невесомого стержня равномерно распределены $2m+2n$ грузиков равного веса (рис. 6); подпертый в середине стержень будет находиться в состоянии равновесия; $2m$ грузиков могут быть заменены равным им по весу одним грузом P, приложенным в центре их тяжести, который находится на расстоянии n от середины стержня; подобно

[1] Ж. Лагранж, Аналитическая механика, т. I, Гостехиздат, 1950, стр. 20.

этому $2n$ грузиков могут быть заменены равным им по весу грузом Q, приложенным в их центре тяжести, расположенном на расстоянии m от середины. При этой замене по концам стержня длиной $m+n$ будут подвешены грузы P и Q; отношение этих грузов друг к другу $\frac{P}{Q}=\frac{m}{n}$, т. е. при равновесии стержня грузы обратно пропорциональны их расстояниям до точки опоры.

Доказательство закона рычага, данное Архимедом, видоизменялось механиками последующих веков в целях придания ему большей строгости. Но, как утверждает Лагранж, «нарушив простоту этого доказательства, они почти ничего не выиграли с точки зрения точности»[1].

Закон рычага позволил древним механикам внести бóльшую ясность в объяснение изученных эмпирически действий подвижного блока, вóрота и некоторых других простых механизмов.

Архимед не ограничил свои механические исследования статикой твердых тел. Он заложил основы учения о равновесии жидкостей — гидростатики — в сочинении «О плавающих телах». При выводе условий равновесия жидкостей Архимед исходил из опытного факта, что жидкость во всех частях однородна, непрерывна и что менее сжатая часть жидкости вытесняется более сжатой.

«Предполагается,— писал он,— что жидкость по природе своей такова, что при равномерном и непрерывном расположении ее частиц менее сдавленная частица вытесняется более сдавленной и что отдельные частицы этой жидкости испытывают давление отвесно расположенной над ними жидкости, поскольку эта жидкость не замкнута в чем-либо или не испытывает давления со стороны какого-либо другого предмета»[2]. Этот постулат, вытекающий из опытного исследования жидкостей, послужил Архимеду основой для чисто геометрического вывода законов гидростатики.

Исходя из него, он установил, что поверхность всякой покоящейся жидкости имеет форму сферы, центр которой совпадает с центром Земли. Далее он доказал, что

---

[1] Ж. Лагранж, Аналитическая механика, т. I, Гостехиздат, 1950, стр. 19.

[2] Архимед, О плавающих телах. Сб. «Начала гидростатики», Гостехтеоретиздат, 1933.

«твердые тела, имеющие при равном объеме и равный с жидкостью вес, будучи опущены в жидкость, погружаются в нее настолько, что совершенно не выступают над ее поверхностью, но и не опускаются в нее сколько-нибудь глубже». Наконец, Архимед сформулировал свой знаменитый закон: «Твердое тело, которое легче жидкости, будучи опущено в жидкость, погружается настолько, что объем жидкости, равный объему погруженной части тела, имеет тот же вес, как и все тело».

Рассматривая равновесие плавающего тела, Архимед исходил из принципа, что оно испытывает давление снизу вверх, равное превышению веса жидкости, взятой в объеме тела, над его весом. Это давление, по Архимеду, приложено к центру тяжести погруженной части тела и направлено вертикально вверх. Он разобрал возможные случаи плавания тел при различных соотношениях между весом плавающего тела и весом вытесненной им жидкости. Не ограничиваясь решением проблемы в самом общем виде, Архимед рассмотрел на примере шарового сегмента значение формы плавающего тела для условий его равновесия.

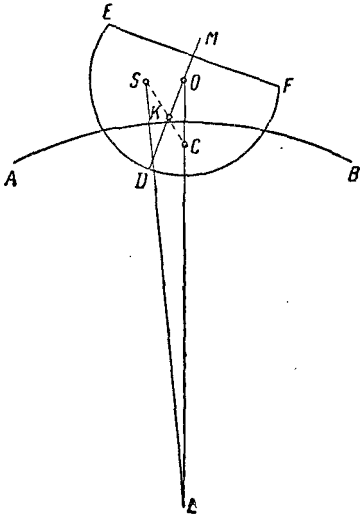

Рис. 7. Равновесие плавающего сегмента шара по Архимеду.

Положим, что в жидкости плавает шаровой сегмент, составляющий более половины шара и обращенный вверх плоскостью основания (рис. 7). Пусть O — центр шара, от которого отсечен сегмент, L — центр Земли, AB — поверхность жидкости, а MD — ось сегмента. «Пусть,— говорит Архимед, — тело заняло наклонное положение... Требуется доказать, что оно не останется в указанном положении, но расположится прямо, так что точки M и D будут лежать на одной вертикали. Так как мы предположили, что тело наклонено, то точки M и D не лежат сейчас на одной вертикали...

Ось части тела, лежащей ниже поверхности жидкости, в которую оно опущено, будет направлена по OL... Центр тяжести всего сегмента EFD лежит на прямой MD. . .»

Основываясь на теоремах своего трактата «О равновесии плоскостей», Архимед утверждал, что центр тяжести части сегмента, выступающий над поверхностью жидкости, лежит в некоторой точке S на линии, проходящей через точку C (центр тяжести погруженной в жидкость части сегмента) и точку K (центр тяжести всего сегмента).

«Так как,— продолжает Архимед,— вес части тела, выступающей над поверхностью жидкости, увлекает его вниз по направлению LS, тогда как часть тела, погруженная в жидкость, стремится кверху по направлению CO, то очевидно, что тело не останется неподвижным, и части его, лежащие со стороны E, будут перемещаться вниз, в то время как части, лежащие со стороны F, будут перемещаться вверх; и так они будут постепенно перемещаться до тех пор, пока прямая MD не станет вертикальной. Когда же прямая MD займет вертикальное положение, то центры тяжести как части тела, погруженной в жидкость, так и части тела, выступающей над ее поверхностью, будут расположены на одной вертикали, и оба они будут лежать на прямой MD. В этом случае противоположные усилия — одно, направленное вверх, и другое, направленное вниз, — будут действовать по одной вертикали, а тело останется неподвижным, так как ни одно из этих усилий не преодолеет другого».

Рассуждая подобным же образом, Архимед вывел условие равновесия шарового сегмента, погруженного в жидкость основанием вниз. Он решил и гораздо более сложную задачу о равновесии плавающего сегмента параболоида вращения. Метод Архимеда требовал умения определять положение центра тяжести части тела, находящейся над поверхностью жидкости, — задача, разрешенная Архимедом в таком виде: «Если от какой-либо величины отнять некоторую часть, центр тяжести которой не совпадает с центром тяжести целого, то центр тяжести остающейся части будет расположен на продолжении прямой, соединяющей центр тяжести отнятой части с центром тяжести целого, за последним и на таком от него расстоянии, при котором отношение указанного расстояния к расстоянию между данными центрами равно отношению веса отнятой части к весу остающейся части»[1].

Ввиду сложности определения положения центра тяжести выступающих над поверхностью жидкости частей плавающих тел применение метода Архимеда для практических целей затруднительно.

При выводе условий равновесия плавающих тел Архимед пользовался лишь понятием о центре тяжести. Понятие о центре давления, облегчающее решение задачи, ему еще не было известно. Оно было введено в механику только в XVI в. Стевином.

Для дальнейшего развития механики было необходимо ясное представление о воздействии одного тела на другое в форме различных проявлений «силы»: давления, натяжения и других, и знание результата действия двух сил, приложенных к одной точке и направленных в одну и ту же или в противоположные стороны. Поэтому в античное время не удалось много прибавить к статике Архимеда.

Ценным вкладом в механику были исследования *Герона*, греческого механика, жившего, вероятно, в I в. до н. э. Его сочинение «Механика» было найдено в арабском переводе. В этом сочинении Герон не только описал пять простых механизмов, но дал и условия равновесия приложенных к ним сил, а также метод нахождения центра тяжести плоских фигур.

Рассмотрение простых механизмов дало возможность Герону ясно сформулировать так называемое «золотое правило» механики. Объясняя выигрыш в силе, получаемый с помощью полиспаста, Герон писал: «Желая поднять тяжесть, мы должны тянуть привязанную к нему (блоку. — *Б.* и *М.*) 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. Если мы теперь прикрепим в неподвижном месте второй блок и через него также перекинем эту веревку, то подымать тяжесть будет еще легче. Но мы прикрепим в не-

---

[1] Сб. «Начала гидростатики», Гостехтеоретиздат, 1933. Примечания проф. А. Н. Долгова.

подвижном месте не отдельные блоки, а их ось, вращающуюся в деревянной коробке, которую мы назовем обоймой, и привяжем эту обойму веревкой к неподвижному месту. Блоки же, соединенные с тяжестью, мы заключим в другую коробку, подобную первой. Чем больше будет блоков, тем легче поднимать тяжесть»[1].

Рассматривая отношения между величиной сил, приложенных к рычагу или подвижному блоку, и путями, пройденными их точками приложения, Герон выразил зависимость между ними в такой форме: «Отношение времен равно обратному отношению движущих сил». Однако он не сумел доказать применимость этого правила к винту и клину, потому что теория наклонной плоскости еще не была известна.

В современной механике, распространившей «золотое правило» на все сложные механизмы, оно формулируется так: «Сколько выигрывается в силе, столько же проигрывается в пути».

Менее удачны были попытки теоретических исследований Герона в механике жидкостей и газов.

Свое сочинение «Пневматика» он начинал следующими словами: «Ввиду того что древние философы и математики считали важным тщательное изучение свойств и силы воздуха, причем одни из них исследовали этот предмет чисто умозрительно, между тем как другие наблюдали действие воздуха на чувства, я счел необходимым изложить все то, что дошло до нас об этом предмете, и прибавить то, что нашли мы сами... Это может принести большую пользу на практике, а также служить предметом большого удивления»[2].

Не подозревая о давлении воздуха, древние ученые прибегали в объяснении явлений, зависящих от этого давления, к умозрительному положению, будто природа «боится пустоты».

Герон также отрицал возможность существования «пустоты» в больших объемах, считая, однако, что мельчайшие частицы разделены пустым пространством. Его приборы построены на основе умозрительного аристоте-

---

[1] Ф. Даннеман, История естествознания, т. I, Медгиз, 1932, стр. 192.

[2] П. Лакур и Я. Аппель, Историческая физика, т. I, изд. Матезис, Одесса, 1908, стр. 195.

левского представления о «боязни пустоты» и законов гидростатики Архимеда. О действии изобретенного им сифона (рис. 8) Герон писал: «Если отверстие сифона находится на равной высоте с поверхностью воды, то, хотя сифон полон воды, вода из него не вытечет и он останется полным, ибо здесь, как в весах, вода, стремясь *на стороне $\alpha\beta$ подняться и на стороне $\beta\gamma$ опуститься*, остается в равновесии. Если же нижнее отверстие сифона ниже поверхности воды, то вода из него вытекает, так как находящаяся в отрезке $\beta\varepsilon$ вода, будучи тяжелей, чем находящаяся в отрезке $\beta\delta$, преодолевает последнюю и увлекает ее за собой».

Объясняя действие сифона, Герон сравнивал струю воды с веревкой, переброшенной через блок. Интересно, что современные исследования также указали на значительное сопротивление водяной струи «на разрыв». Герон считал, что струя воды в сифоне не разрывается еще и потому, что в этом случае в ее изгибе получилась бы «пустота», а этого, по мнению ученых того времени, быть не может.

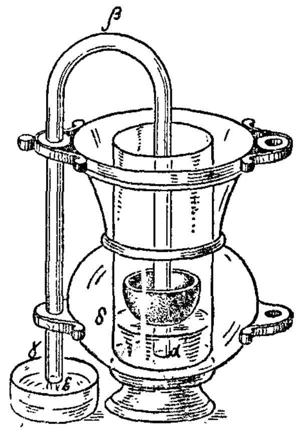

Рис. 8. Сифон Герона.

Сведения о состоянии механики на пороге средневековья можно найти в большом труде, принадлежащем *Паппу* (вторая половина III в.) и состоящем из восьми книг под общим названием «Математический сборник». Последняя из этих книг посвящена приложению геометрии к теории простых механизмов и нахождению центра тяжести различной формы тел.

Папп различал пять простых механизмов — рычаг, клин, винт, блок и ворот. Он пытался из закона рычага вывести принцип действия наклонной плоскости, но ему не удалось решить эту задачу, потому что в то время еще не была понята роль трения, действующего между грузом и наклонной плоскостью.

В эпоху господства Рима деятельность Александрийской академии очень оживилась. Именно тогда получила завершение в трудах астронома *Клавдия Птолемея* (70—

147) геоцентрическая система мира. Была развита сферическая тригонометрия, основы которой заложил еще астроном *Гиппарх* (160—125 гг. до н. э.) и математик *Менелай* (начало н. э.).

В IV—V вв. начался распад Западной Римской империи, что повлекло за собой упадок техники и науки.

«...Римское владычество основывалось на беспощадной эксплуатации завоеванных провинций; империя не только не устранила этой эксплуатации, а напротив, превратила ее в систему... Всеобщее обнищание, сокращение торговых сношений, упадок ремесла, искусства, уменьшение населения, упадок городов, возврат земледелия к более низкому уровню — таков был конечный результат римского мирового владычества»[1].

Римская империя часто подвергалась нашествиям германских, кельтских и других племен, населявших тогда западную часть Европы. Еще в 390 г. до н. э. кельтские племена — галлы — заняли Северную Италию, захватили и разграбили Рим. Но позднее римляне вернули захваченные у них земли и «романизировали» кельтов, которые вошли в состав римского рабовладельческого общества и усвоили римскую культуру.

Жившие за Рейном и Дунаем «варварские» племена, несмотря на совершенные римлянами походы за Рейн, продолжали наносить удары Римской империи извне. Одновременно римские рабы, набиравшиеся из числа пленных «варваров», восставали против своих господ и расшатывали империю изнутри. В результате военных набегов «варваров» и восстаний рабов Римская империя ослабевала... Все большую роль играли в ней наемные войска, формировавшиеся из «варваров». Наконец, в 176 г. последний римский император Ромул Августул был низложен предводителями наемных войск и сослан в Кампанью. На территории бывшей Западной Римской империи образовалось несколько государств. Галлия была завоевана племенем франков, государство которых играло важную роль в истории Западной Европы V—IX вв.

С крушением Римской империи было ликвидировано

[1] Ф. Энгельс, Происхождение семьи, частной собственности и государства, Госполитиздат, 1950, стр. 153—154.

рабовладение и тем самым подготовлена замена труда рабов более производительным трудом крепостных. Открывалась возможность развития производительных сил и прогресса в технике и науке.

МЕХАНИКА ФЕОДАЛЬНОГО ПЕРИОДА (до XVI в.)

4. ТЕХНИКА СРЕДНЕВЕКОВЬЯ

Для раннего средневековья (V—IX вв.) на Западе были характерны низкий уровень развития производства, господство натурального хозяйства и упадок хозяйственной деятельности городов. В течение этого периода, сохранившего еще пережитки рабовладельческих отношений античного времени, появилось феодальное землевладение и происходило закрепощение крестьянских масс. Слаборазвитое ремесленное производство довольствовалось примитивной техникой.

Однако к X—XI вв. уже произошли значительные изменения в экономической жизни Европы. В земледелии стал применяться железный плуг, получили развитие техника добычи, выплавки и обработки металлов, выделка тканей, обработка дерева, кожи, камня. Наряду со строительством деревянных зданий возводились каменные сооружения. Завершился процесс феодализации в главнейших западноевропейских странах, и основная масса ранее свободных крестьян превратилась в крепостных.

Развитие феодального способа производства достигло такого уровня, при котором стало необходимым отделение ремесла от сельского хозяйства. Появилось значительное число специалистов-ремесленников, бежавших от феодалов в города. Возникло товарное производство. Первоначально ремесленники сами сбывали продукты своего труда. Позднее вывозить товары за пределы города и даже страны стали купцы, скупавшие продукцию ремесленных мастерских.

С XI в. населенные ремесленниками и купцами города начали борьбу за свое освобождение от власти феодалов. Многие из них, присоединив к себе окружающие деревни, образовали самостоятельные государства.

После освобождения городов от власти феодалов началось дальнейшее развитие производства, а вместе с тем и техники. Средневековые техники часто пользовались небольшими трехножными кранами. Груз поднимался при помощи полиспаста с двумя-тремя подвижными блоками. Конец каната навивался на барабан ворота, вращавшегося людьми.

Для погрузки товаров на суда и других целей широко применялись поворотные краны. Подняв тюк с товаром, кран поворачивался вокруг вертикальной оси, перенося его на другое место. Подобные же краны были в употреблении на железоделательных заводах.

Современные подъемные краны по идее не заключают в себе ничего нового. Только вместо мускульной силы теперь применяются паровые и электрические лебедки. Но, конечно, по размерам средневековые деревянные подъемные краны — игрушки в сравнении с современными стальными конструкциями.

В эпоху развитого феодализма появилась большая потребность в железе, широко применявшемся для производства сельскохозяйственных и военных орудий, ремесленных инструментов и предметов домашнего обихода. Кроме железа, нужны были медь и серебро для церковной утвари, украшений и других изделий.

В связи с этим стало быстро развиваться горное дело. Разработка медных и серебряных руд велась под землей в довольно глубоких шахтах. Перед техникой встали задачи доставки добытой руды в подземных выработках к стволам шахт, подъема руды и транспортировки ее на заводы.

Для подъема руды из шахт применялись устройства, приводившиеся в действие мускульной силой людей или лошадей. В качестве двигателя широко использовались также водяные колеса. Такое колесо имело два ряда лопаток. Направляя струю воды на тот или другой ряд, можно было изменять направление вращения водяного колеса и соединенного с ним вала ворота.

При сооружении больших высоких зданий нередко возникала задача уплотнения грунта под фундамент. Строители издавна пользовались для этого забивкой свай. Способы забивки свай совершенствовались, и в XIV—XV вв. сваи забивались при помощи специального станка — «копра». Ударный груз («баба») поднимался канатом, переброшенным через блок и навивавшимся на вал ворота. Падая, груз наносил удар по торцу сваи. В XVI в. копер принял почти современный вид. Ударный груз двигался между направляющими брусьями, что обеспечивало точность работы.

В средние века были изобретены первые механические колесные часы, началось производство стекла, зеркал, очков и многих других предметов.

Большое значение имело изобретение *Иоганном Гутенбергом* (1400—1468) способа печатания книг при помощи набора из отдельных букв (печатание досками с вырезанным на них текстом было известно и ранее). Изобретение книгопечатания способствовало быстрому распространению знаний, так как печатные книги выпускались тысячами экземпляров.

С развитием техники возникла необходимость создания теории простых машин, лишь отчасти разработанной античными учеными.

Так наряду с техникой развивалась и механика.

5. СОСТОЯНИЕ НАУКИ В ЭПОХУ РАННЕГО СРЕДНЕВЕКОВЬЯ

С крушением Римского государства наступил упадок античной культуры.

Книжные богатства Александрийской библиотеки сильно пострадали еще во время осады Александрии Юлием Цезарем. Правда, потеря части рукописей была возмещена в некоторой степени передачей в Александрийскую библиотеку сокровищ Пергамской библиотеки, но в конце IV в. Александрийская библиотека подверглась нападению толпы фанатично настроенных христиан и большая часть ее погибла.

В 529 г. византийский император Юстиниан закрыл афинские философские школы. В 640 г. Александрия была взята арабами и деятельность Александрийской академии прекратилась. Античная наука, казалось, погибла. Только в уцелевших от военных бурь частных библиотеках сохранились немногие из сочинений философов, астрономов, математиков и механиков античной древности.

В Западной Европе господствовало религиозное мировоззрение. С точки зрения богословов — европейских ученых того времени — явления природы представляют собой только иллюстрацию к учению церкви о сотворении мира и царстве божьем. Религиозное мировоззрение вело к отрицанию не только результатов исследований, полученных древними учеными, но и самой необходимости познания природы и борьбы с ее стихиями. На почве мистических настроений, являющихся неизменным спутником религиозности, в Европе развились лженауки — магия, астрология и алхимия, привлекавшие людей несбыточными обещаниями.

В культурном отношении в эпоху раннего средневековья население Европы стояло на очень низкой ступени развития. Школы находились в руках церкви, и образование носило духовный характер. Единственным «образованным» классом было духовенство, враждебно относившееся к античной науке, место которой заняло богословие. В монастырских школах основой преподавания служила составленная в V в. книга латинского «грамматика» Марциана Капеллы «О браке филологии и Меркурия», в которой были кратко изложены грамматика, риторика, диалектика, геометрия, астрономия и теория музыки.

В VI в. эти семь «искусств» вошли в средневековые учебники в таком виде, в каком они были нужны духовным лицам. Например, риторика учила искусству чтения проповедей, астрономия имела единственной целью определение дат церковных праздников и т. п.

Знания древних греков и римлян в Европе были забыты. Сочинениям греческих и римских ученых угрожала гибель. Они уцелели благодаря тому, что научные интересы возникли в странах, покоренных в VII—VIII вв. арабами.

Как неоднократно происходило в истории человечества, завоеватели восприняли более высокую культуру покоренных ими народов. По распоряжению багдадских халифов многие сочинения греческих философов, математиков и астрономов были переведены на арабский язык, ставший общепринятым языком ученых Ближнего Востока.

Одновременно значительное влияние оказали на состояние науки арабов культурные достижения народов Средней Азии, Ирана и Индии.

В отношении культуры и развития естествознания покоренные арабами страны значительно превосходили в раннем средневековье Западную Европу. В этих странах продолжалось развитие естествознания, уходившего корнями в античную и в древние культуры Вавилона, Египта, Индии и Ирана.

Из точных знаний древних греков ученые этих стран в совершенстве овладели математикой и астрономией. В искусстве измерений они даже превзошли их. На арабский язык переводились труды Аполлония, Птолемея, Архимеда. а также математиков Индии, например *Брамагупты* (598—660).

Сочинение Брамагупты было переработано в 820 г. хорезмийским математиком *Ибн Муса аль-Хорезми* (IX в.), который и сам написал труд, облегчающий торговые расчеты, измерения земельных участков и тому подобные задачи. В этом сочинении были даны решения уравнений первой и второй степени.

Механика значительно меньше, чем математика, интересовала арабских ученых, которые не ставили каких-либо новых опытов и не развили этой науки, сохранив лишь в переводах некоторые древние сочинения.

Важнейшим трудом по механике на арабском языке была «Книга о весах мудрости» узбекского ученого XII в. *Альгацини (Аль-Хазини)*, жившего в Хорезме. Хотя главная тема книги — описание устройства и употребления весов оригинальной конструкции, автор дал очерк состояния знаний своей эпохи в области механики. В этом сочинении изложены теоремы о центре тяжести и равновесии твердых и жидких тел.

По существу своего представления о тяжести Альгацини стоял на позициях античных натурфилософов. Тяжесть — неотъемлемое свойство самих тел, а не результат действия на них других тел. Тяжелое тело давит на подставку. Если оно не встречает достаточного сопротивления, то падает к «центру мира», достигнув которого должно остановиться.

Альгацини отмечает, что скорость движения тела в жидкой среде пропорциональна «разжижению» последней.

Что касается учения о рычаге и о равновесии жидких тел, то в этих вопросах Альгацини повторил положения Архимеда. Он также указал на необходимость сферичной поверхности для жидкости при ее равновесии и на «потерю» веса твердых тел, погруженных в жидкость, равную весу вытесненной жидкости.

Описанные Альгацини весы были предназначены главным образом для определения относительной плотности тел. Пользуясь ими, он составил таблицу очень точных удельных весов различных металлов, слоновой кости, жемчуга и других предметов, служивших объектами торговли. В его книге изложены все основные сведения по механике, которыми владели арабские ученые.

Знакомство с содержанием сочинения Альгацини подтверждает, что арабские и среднеазиатские ученые того времени обладали большой изобретательностью в построении измерительных приборов и искусством очень точных измерений, но в области механики оставались на позициях Архимеда и его ближайших последователей.

Во время крестовых походов европейцы познакомились с культурой Востока и некоторыми изобретениями, в том числе, быть может, и с употреблением пороха.

Техники чувствовали все бóльшую потребность в научных знаниях, но были бессильны приобрести их самостоятельно. Молодежь устремилась в Испанию, где в арабских университетах можно было познакомиться с наукой древнегреческих философов.

Для удовлетворения потребности в знаниях стали открываться городские светские школы. Они не зависели от церковных властей и содержались за счет платы, вносимой учащимися.

Эти школы послужили базой для создания первых университетов, которые уже с XII в. появились сначала в Италии и Франции, а несколько позднее и в других европейских странах. Так возник, например, университет в Болонье, прославившийся основательными познаниями в юриспруденции, которые он давал своим слушателям. Вслед за Болонским стали возникать и другие «схоларные» городские университеты.

Католическая церковь скоро захватила в свои руки управление университетами. Она назначала возглавлявших университеты «канцлеров» и профессоров и зорко следила за направлением преподавания. По постановлению отцов церкви на двух соборах (в 1209 и 1215 гг.) физика и математика Аристотеля были запрещены, как способствующие возникновению «ересей». Только в 70-х годах XIII в. римский папа разрешил изучение в университетах натурфилософских сочинений Аристотеля при условии очищения их от всего, что было несогласно с библейскими взглядами на природу. После этого канонизированные католической церковью сочинения Аристотеля стали основным предметом университетских программ. Профессора университетов должны были давать клятву, что они не отступят от учения Аристотеля.

Университетская наука средних веков — схоластика — имела целью не исследование природы, не разрешение возникавших в борьбе с ней технических проблем, а изучение высказываний о явлениях природы античных философов и главным образом непререкаемого авторитета — Аристотеля. Она стремилась построить представление о мире методом формальной логики, исходя из умозрительных положений. Механика Архимеда не входила в программу университетов. Из античных трудов по этой отрасли знания изучались лишь «Проблемы механики».

Между тем развивавшиеся производство и торговля нуждались в знании механики и вообще физики. Перед техниками и практиками встала задача создания теории механизмов и строительного искусства. Однако им были совершенно недоступны не только труды Архимеда, написанные на греческом языке, но и латинские сочинения некоторых механиков, пытавшихся создать эту теорию.

Мастера, художники-архитекторы, вышедшие из народной среды и редко имевшие школьное образование, должны были стать исследователями законов природы.

Обучившись у живописца, скульптора или золотых дел мастера, художники поступали на службу к какому-либо князю, герцогу или республиканскому самостоятельному городу. На их обязанности лежало возведение укреплений и зданий, строительство мостов, руководство мелиорационными работами, а также снабжение населенных пунктов водой. Художники были одновременно архитекторами и инженерами, черпая свои знания самостоятельно из книг и увеличивая их путем опыта.

Из числа этих практиков, призванных стать теоретиками-исследователями, особенно выделились своими талантами и многосторонностью знаний художники Филиппо Брунеллески и Леон Баттиста Альберти.

Брунеллески жил в конце XIV и начале XV в. Как художник он занимался теоретическим исследованием законов перспективы, а как инженер разрабатывал математические правила достижения пропорций частей здания, которые удовлетворяли бы требованиям техники, а также изобретал и конструировал различные машины.

Брунеллески не получил систематического образования. Сведения из области математики он приобрел из своеобразных математических руководств того времени, содержащих, кроме описания арифметических действий, доказательства теорем элементарной геометрии.

Проектируя купол здания огромного собора во Флоренции, сооружая крепости в Пизе и укрепления в долине реки Эльзы, строя плотину на реке По и укрепления в гаванях Римини и Пезаро, Брунеллески мог решать возникавшие проблемы, пользуясь практически понятым к тому времени законом наклонной плоскости. Но движение тел оставалось неизвестной областью, в которой играет роль невидимая «сила», познаваемая лишь по результатам ее действия.

Брунеллески, как и последующие исследователи, был вынужден остановиться на границе этой загадочной для его времени области, куда впервые «проникли» лишь гениальные механики XVII в.

Более подготовленным к занятиям теорией механики был живший в первой половине XV в. художник *Альберти.* Сын богатого итальянского купца, он получил общее образование и знал в объеме среднего учебного заведения того времени математику, астрономию и латинский язык. Последнее позволяло ему пользоваться научными сочинениями, которые писались в то время почти исключительно на латинском языке. Он приобрел большую известность как архитектор-теоретик. Художники-практики часто обращались к нему за советами и указаниями.

Альберти написал на латинском и на итальянском языках (руководствуясь в выборе между ними тем, для кого предназначались его книги) и опубликовал несколько сочинений, посвященных теоретическим основам учения о перспективе и другим вопросам. Одна из его работ была посвящена теоретико-математической основе практического применения механики.

Наконец, современник Альберти механик и архитектор *Франческо ди Джорджо Мартини* (1425—1506) написал трактат, в котором он по-новому, научно разработал ряд проблем военной техники, при решении которых ранее руководствовались лишь практическими знаниями и глазомером. Франческо пытался установить отношение между количеством пороха и весом пушечного снаряда, определить траекторию снаряда в зависимости от угла, под которым произведен выстрел, и другие вопросы, вставшие перед военной техникой после введения огнестрельного оружия. Как механик-практик он при решении теоретических задач основывался на опытах. Но, как и его предшественники, Франческо ограничивался решением частных задач, не пытаясь установить законы или общие принципы механики.

Наиболее яркий представитель нового течения в науке, работы которого оказали большое влияние на развитие экспериментального метода в физике (и в частности в механике),— знаменитый итальянский художник *Леонардо да Винчи* (1452—1519).

Леонардо находился на службе у миланского герцога Лодовико Моро в качестве архитектора и инженера. В его обязанности входило осушение долины реки Арно, сооружение крепостей, построение разного рода механизмов. Не получив университетского образования, Леонардо не был связан канонами аристотелевского учения, хотя в своих высказываниях и стоял иногда на аристотелевской точке зрения. Целью всей его жизни была борьба за экспериментальный метод познания законов природы. Он не только призывал к опытному исследованию природы, но и сам производил опыты. В его записных книжках нашли чертежи, сделанные с целью определения величины равнодействующей двух сил, приложенных под углом к материальной точке, чертежи двухсторонней наклонной плоскости, на которой лежат грузы, удерживающие друг друга переброшенной через блок веревкой, и тому подобных опытов.

Хотя ему не удалось вывести условия равновесия тела на наклонной плоскости, но экспериментальным путем он установил, что скатывающемуся по наклонной плоскости шару нужно во столько раз больше времени, чтобы достигнуть ее основания (по сравнению со свободным падением), во сколько раз длина наклонной плоскости больше ее высоты.

Леонардо близко подошел к решению проблемы свободного падения тел, утверждая, что скорость падения возрастает в арифметической прогрессии. При решении вопроса о равновесии грузов на косом рычаге он приблизился к определению статического момента силы. Его вывод статического момента силы был следующим: пусть AD (рис. 9) — стержень, вращающийся около точки A, как центра. К концу стержня подвешен груз P, а на шнурке, переброшенном через блок E — груз Q. «Реальный» рычаг, согласно Леонардо,— это AD, а «потенциальный»: для силы P — AB, для силы Q — AC. Силы относятся обратно пропорционально плечам «потенциального» рычага, т. е. $\frac{P}{Q} = \frac{AC}{AB}$. Следовательно, $P \cdot \overline{AB} = Q \cdot \overline{AC}$.

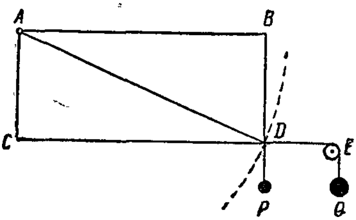

Рис. 9. К выводу Леонардо да Винчи принципа статического момента.

Он утверждал также (не приводя доказательства), что падение по дуге круга происходит быстрее, чем по хорде.

В некоторых афоризмах Леонардо да Винчи можно видеть не вполне явную формулировку принципа инерции движения. Так, например, он говорил, что «никакая неодушевленная вещь не движется сама собой» и что «всякий толчок склонен к вечной продолжительности».

Не ограничиваясь механикой твердых тел, Леонардо занимался вопросами гидравлики. Ряд чертежей и рисунков в его рукописях говорит об опытах, имевших целью исследование вопросов механики жидкостей: изображение сосуда с отверстиями в стенке, через которые вытекают струи воды, причем струя бьет тем дальше, чем ниже отверстие; изображение сосуда, из нижней части которого отходит загнутая вверх трубка, вода в сосуде подвергается давлению, от размеров которого зависит высота поднятия ее в трубке; рисунок сообщающихся сосудов разного диаметра, в которых вода стоит на одном уровне, и т. п.

Результаты своих опытов Леонардо использовал для математических расчетов. Он утверждал, что «никакой достоверности нет в науках там, где нельзя приложить ни одной из математических наук, и в том, что не имеет связи с числом» и что «механика — истинный рай математических наук». Но, как убежденный экспериментатор, он считал обязательным «предпослать потенциальным доказательствам реальные для того, чтобы более легкое было ступенью, руководителем к более трудному», подразумевая под потенциальным доказательством математическое выражение наблюдаемых фактов, а под реальным — непосредственные результаты опыта.

Его эксперименты и наблюдения в области механики находились в тесной связи с практическими инженерными работами или же производились с целью обоснования последующих изобретений. Например, задумав построить летательную машину, Леонардо внимательно наблюдал полет птиц, чтобы понять зависимость возникающей подъемной силы от положения крыла.

Леонардо да Винчи предполагал объединить в одном энциклопедическом труде «О вещах природы» все физические знания своего времени. Эту задачу ему выполнить не удалось. Но его рукописи с описаниями произведенных им опытов, как доказал французский физик П. Дюгем, в многочисленных списках распространились по всей Италии. Механики и математики более позднего периода — Н. Тарталья, И. Кардан, Дж. Бенедетти и др.— черпали из них сведения, не указывая на источник.

6. ОБРАЩЕНИЕ К ЭКСПЕРИМЕНТУ

В конце XV и начале XVI в. теологическое мировоззрение постепенно стало заменяться новым. Оно уже не удовлетворяло купеческие и промышленные слои общества. Люди стали больше надеяться на свой ум, ловкость и расчет, чем на «бога». Они уверовали в силу человека и сделали его центром внимания. Возникшее новое мировоззрение получило название гуманизма (от латинского слова humanus, т. е. «человеческий»).

Проявляя повышенный интерес к жизни древних греков и римлян, их науке и искусству (почему и сама эпоха получила название эпохи Возрождения наук и искусств), гуманисты подчеркивали светский характер своей литературы и науки. Особенностью их отношения к природе было обращение к экспериментальному методу изучения ее законов, что объяснялось потребностями развиваемого буржуазией производства. «Можно сказать, что собственно систематическая экспериментальная наука стала возможной лишь с этого времени» [1], то есть с эпохи XV—XVI вв.

В противовес официальной науке возникла внецеховая наука «академий» — добровольных обществ, в которые стали объединяться инженеры, художники и другие специалисты, не имевшие отношения к университетам.

«Академии» не были официальными учреждениями и большей частью не имели писаного устава. В них свободно обсуждались всевозможные вопросы науки и среди них — задачи техники и связанные с ними проблемы механики, как например вопрос о свободном падении тел.

В 1540 г. во Флоренции организовался кружок под шутливым названием «Мокрые», объединивший горожан, интересующихся наукой. Основателями его были: любитель философии сапожник Джелли, враг схоластической учености аптекарь и поэт Граццини и известный математик и переводчик ученых трудов Козимо Бартоли. Вскоре этот кружок был преобразован герцогом Тосканы во Флорентийскую академию, президент которой был назначен одновременно ректором университета, что сделало академию влиятельным правительственным учреждением.

Подобные же академии были организованы в XVI в. в Венеции, Болонье, Перудже, Неаполе и других больших и малых городах Италии. Они сыграли большую роль в развитии математики и механики.

Член Флорентийской академии астроном и математик *Игнацио Данти* отмечал, что только благодаря деятельности академии не были забыты механика, математика, оптика и другие точные науки, не интересовавшие университетских ученых.

---

[1] Ф. Энгельс, Диалектика природы, Огиз, 1948, стр. 148.

Флорентийская академия в течение первых десятилетий своего существования считала одной из важнейших задач популяризацию знаний. В ней читались общедоступные популярные лекции на итальянском языке (тосканском наречии), на который переводились ее членами научные сочинения.

Один из организаторов Флорентийской академии — Джелли — писал по поводу этих лекций, что «...можно снять у народа с носа синие очки, надетые ему учеными-латинистами и рисующие ему ложную и искаженную картину мира. Новооснованная академия сорвет с них всех маску, она всех их подвергнет испытанию... Конечно, им было очень приятно, что им все верили, когда они о каком-либо предмете высказывали утверждение, которого не могли или не хотели доказать. Теперь академия всем открывает глаза, она скрепляет печатью приговор ученым-латинистам» [1].

С этим высказыванием перекликается заявление знаменитого энциклопедиста того времени, члена Флорентийской академии *Бенедетто Варки*, который в своем сочинении, вышедшем в свет в 1544 г., 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».[2]

Практическая бесполезность и теоретическая несостоятельность физических и особенно механических воззрений Аристотеля уже были осознаны интересовавшимися естествознанием людьми.

Читатели научно-популярной литературы на итальянских наречиях проявляли интерес к проблеме свободного падения тел, к вопросу о весе воздуха и к тому подобным вопросам физики и механики, еще не разрешенным наукой того времени.

---

[1] Л. Ольшки, История научной литературы на новых языках, т. II, Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 109.

[2] Там же, стр. 82.

Неискушенные наблюдатели занимались даже постановкой простейших опытов, хотя, конечно, лишь немногие из них были способны к научному исследованию.

В то время еще не было ясного понимания, что такое эксперимент. «Опыты» нередко были поисками каких-то чудодейственных вещей, как например алхимические опыты превращения ртути в золото или составление «жизненного элексира», т. е. носили характер магии. К числу подобных опытов относились и попытки изготовления «живых» автоматов.

В Англии выступил с пропагандой экспериментального метода *Френсис Бэкон* (1561—1626).

Ф. Бэкон являлся крайним сторонником индуктивного метода в науке. Математика была ему чужда. Но он уже не был просто эмпириком, считая, что наблюдаемые факты должны «перерабатываться в разуме».

Развивая свои воззрения на процесс исследования, Ф. Бэкон указывал, что не следует на основе нескольких фактов пытаться создать общие законы природы. «Два пути существуют и могут существовать для отыскания истины,— писал он,— один воспаряет от ощущений и частностей к наиболее общим аксиомам и, идя от этих оснований и их непоколебимой истинности, обсуждает и открывает средние аксиомы. Этим путем и пользуются ныне. Другой же путь выводит аксиомы из ощущений и частности, поднимаясь непрерывно и постепенно, пока наконец не приходит к наиболее общим аксиомам. Этот путь истинный, но не испытанный» [1].

Ф. Бэкон подверг тонкому анализу научное мышление человека, находящегося под влиянием предвзятых идей, возникающих вследствие его индивидуальных особенностей, а также в результате переоценки значения слов.

Неумолимый враг умозрительных построений натурфилософов, Бэкон писал: «Тонкость природы неизмеримо превосходит тонкость наших чувств и нашего ума, так что все эти прекрасные созерцания, размышления, толкования — бессмысленная вещь» [2].

Указывая на разницу в развитии схоластической науки и техники, из которых первая оставалась в тече-

---

[1] Ф. Бэкон, Новый органон, Соцэкгиз, 1936, стр. 111.
[2] Там же, стр. 109.

ние веков бесплодной, тогда как техника успела достичь значительных успехов, Ф. Бэкон видел причину этого в «ложном преувеличении сил и способностей человеческого разума».

Френсис Бэкон вошел в историю естествознания как проповедник необходимости экспериментального исследования явлений природы, как один из основоположников материалистического направления в философии и защитник идеи о том, что роль науки заключается не в *«пустом времяпрепровождении»* и что наука должна быть не «предметом для споров», чем была схоластика, а средством «принести пользу» и удовлетворять потребности жизни.

7. РАЗВИТИЕ СТАТИКИ

Античные ученые выводили условия равновесия простых механизмов из правила рычага. Механики XVI—XVII вв. ввели в статику новый принцип моментов, подразумевая под этим термином произведение силы на перпендикуляр, опущенный на ее направление из неподвижной точки вращающегося твердого тела.

Впервые принцип моментов, по мнению Лагранжа, был введен в статику твердого тела итальянским геометром и механиком *Гвидо Убальди дель Монте* (1545—1607), хотя этот принцип был известен еще Леонардо да Винчи.

В своей «Механике» Убальди дал статическую теорию простых механизмов и описал водоподъемный винт Архимеда. Он строго придерживался геометрического метода своего великого учителя — Архимеда. Изучая действие простых механизмов, Убальди пришел к выводу, что сущность вопроса заключается не в передвижении ими грузов, а в уравновешивании их силами.

Поэтому можно было просто говорить о силах, уравновешивающих друг друга. Однако понятие силы все-таки большей частью отождествлялось с понятием давления или тяги.

Рассматривая равновесие двух сил, приложенных к двойному блоку (т. е. двум блокам разного диаметра, соединенным вместе и закрепленным на одной оси), Убальди пришел к выводу принципа моментов.

Пусть сила F (рис. 10) приложена к окружности большого, а сила P — к окружности малого блоков. Силы параллельны между собой и направлены перпендикулярно к линии, соединяющей точки их приложения.

На основании закона рычага для равновесия этой системы необходимо, чтобы произведения сил на радиусы соответствующих блоков были равны: $F \cdot R = P \cdot r$, где R — радиус большого, r — радиус малого блоков.

Если перенести точки приложения этих сил так, чтобы силы были направлены под углом по отношению друг к другу, то равновесие не нарушится. Математическое выражение условия равновесия останется тем же.

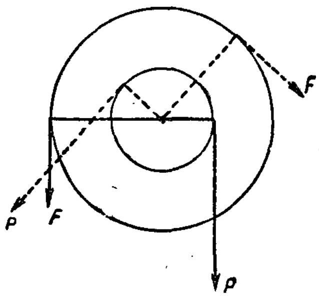

Рис. 10. К выводу Гвидо Убальди принципа статических моментов.

Радиусы блоков представляют собой перпендикуляры, опущенные из центра вращения тела на направление сил. Отсюда Убальди вывел принцип статических моментов: для равновесия тела, имеющего неподвижную точку, необходимо, чтобы моменты двух действующих на тело сил были равны и стремились повернуть тело в противоположных направлениях.

Но Убальди не сумел применить это новое понятие к решению проблемы равновесия тел на наклонной плоскости, остававшейся для него, как и для античных механиков, загадкой.

Закон наклонной плоскости удалось вывести голландскому механику *Симону Стевину* (1548—1620). Основные открытия были сделаны Стевином в области гидростатики (о чем будет сказано дальше). Но он плодотворно работал и в области статики твердых тел.

Подобно Архимеду, Стевин при построении своих теорий исходил из немногих очевидных положений и полученные выводы подвергал проверке опытом. Стевин был не эмпириком, а экспериментатором в современном значении этого слова и по своему методу исследования может по справедливости считаться ученым нового времени.

Закон наклонной плоскости Стевин установил путем следующих рассуждений. Он представил себе, что замкнутая цепь из шаров равного веса и величины, расположенных на одинаковых расстояниях друг от друга, обвивает трехгранную призму, одна из боковых граней которой лежит горизонтально (рис. 11).

На каждой из обращенных вверх граней число шаров цепи пропорционально ширине грани. Нижняя часть цепи, висящая под призмой, имеет симметричную форму. Очевидно, что висящая цепь не оказывает влияния на

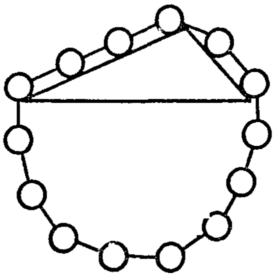

Рис. 11. К выводу Стевином закона наклонной плоскости.

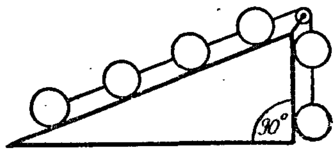

Рис. 12. К выводу Стевином закона наклонной плоскости.

положение частей, лежащих на верхних гранях. Эти части разной длины уравновешивают друг друга, так как в противном случае они пришли бы в движение, которое продолжалось бы вечно. Однако повседневный опыт убеждает нас, что такое движение никогда не наблюдается в действительности.

Грани призмы в мысленном опыте Стевина представляют собой наклонные плоскости, имеющие общую высоту. Грузы, пропорциональные длине этих наклонных плоскостей, взаимно удерживаются с одинаковой силой. Следовательно, для равновесия грузов их вес должен быть пропорционален длинам соответствующих наклонных плоскостей.

Повторим данный опыт с двумя наклонными плоскостями, одна из которых перпендикулярна к плоскости горизонта, т. е. служит высотой другой наклонной плоскости (рис. 12). Уравновешивающиеся грузы и в этом случае будут пропорциональны длинам. Таким образом, груз на наклонной плоскости удерживается во столько раз меньшим грузом, во сколько раз высота этой наклонной плоскости меньше ее длины.

Исходя из условий равновесия тел на наклонной плоскости, Стевин ввел в механику понятие о сложении и разложении сил.

Представим себе, что груз g на наклонной плоскости AO_2 (рис. 13) удерживается прикрепленной к нему нитью, параллельной длине наклонной плоскости.

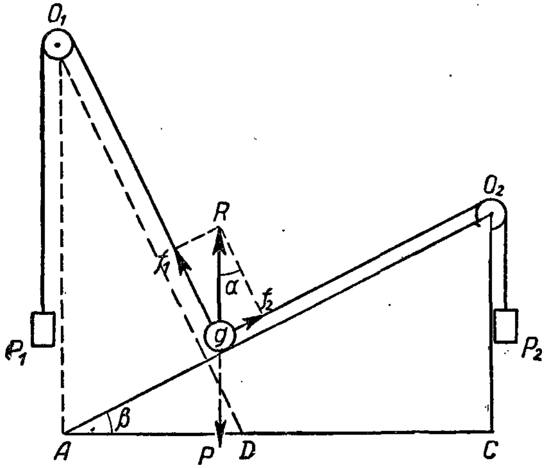

Рис. 13. Теорема Стевина о параллелограмме сил.

Для этого нить перебрасывается через неподвижный блок O_2 и на ее конце подвешивается соответствующий груз P_2.

Можно, не нарушая равновесия, убрать наклонную плоскость, прикрепив лежащий на ней груз g к другой нити, направленной перпендикулярно к плоскости, и подвесив соответствующий груз P_1 к переброшенному через блок O_1 концу нити. Очевидно, что вес P груза g уравновешивается натяжением нитей.

Натяжение нити gO_2 определится отношением высоты наклонной плоскости O_2C к ее длине O_2A. Для определения натяжения нити gO_1 представим себе, что груз g находится на наклонной плоскости O_1D и уравновешивается грузом P_1. Натяжение нити gO_1 определится отношением высоты O_1A воображаемой наклонной плоскости к ее длине O_1D.

Теперь проведем через центр тяжести груза g вертикальную линию и отложим на ней вниз отрезок P, соответствующий весу груза g, а вверх такой же отрезок R. Опустив из точки R перпендикуляры на qO_2 и qO_1, получим отрезки f_1 и f_2. Стевин доказал, что эти отрезки соответствуют весам грузов P_1 и P_2, т. е. представляют собой натяжения нитей, удерживающих груз g. Он исходил из того, что треугольники gRf_2 и AO_2C подобны. Поэтому f_2 относится к R, как O_2C к O_2A, но таково же отношение веса груза P_2 к весу груза g. Аналогично можно установить и соответствие f_1 весу груза P_1.

Груз g удерживается натяжениями, изображаемыми отрезками f_1 и f_2, представляющими собой стороны прямоугольника с диагональю R, равной по величине отрезку P, изображающему вес груза g. Следовательно, сила может уравновешиваться двумя другими силами, являющимися сторонами прямоугольника, у которого эта сила, направленная в противоположную сторону, служит диагональю.

Подобное же рассуждение Стевин пытался распространить на случай, когда направления сил не образуют прямого угла.

Таким образом, Стевин установил, что три силы, действующие на точку по трем разным направлениям, взаимно уравновешиваются, если каждая из них, отложенная в противоположном направлении, представляет собой диагональ параллелограмма, сторонами которого служат две другие силы.

В трудах Стевина получили развитие заложенные еще Архимедом основы гидростатики.

Проведя молодость в далеких плаваниях, Стевин хорошо представлял себе важность решения вопроса об устойчивости судна. Позднее, в качестве инспектора водных сооружений Голландии, имеющих огромное значение для существования этой маленькой страны, он должен был заняться вычислением давления на ворота шлюзов. Эта практическая деятельность определила направление его научных исследований. Свои гидростатические исследования Стевин изложил в большом сочинении «Начала гидростатики», изданном на фламандском языке в 1587 г.

Сущность представлений Стевина о жидкости, положенных в основу его исследований, заключается в том, что равновесие какой-либо частицы жидкости обусловлено давлением окружающих ее частиц. Так как каждая частица жидкости находится под действием силы тяжести, то, следовательно, в равновесии она поддерживается давлением, направленным снизу вверх и равным ее весу. Из этого положения было нетрудно вывести, что погруженное в жидкость твердое тело испытывает давление снизу вверх, равное весу вытесненной им жидкости.

Развивая гидростатику Архимеда, Стевин первый ввел понятие о центре давления.

Плавающее тело находится под действием двух сил. Одна из них — собственная тяжесть, влекущая тело вниз и приложенная к центру массы. Другая — сила, выталкивающая тело из жидкости вверх, равная весу вытесненной телом жидкости и приложенная к центру давления, который совпадает с центром тяжести вытесненной жидкости.

По величине эти силы равны, а по направлению 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 его наклона к горизонтальной поверхности жидкости.

Не повторяя рассуждений Стевина, приведем лишь его вывод: «Итак, тело, плавающее в воде, занимает такое положение, при котором центр тяжести его лежит на вертикальной линии, проходящей через центр тяжести занимаемого им объема воды» [1].

Во времена Стевина голландское правительство начало постройку судов, над палубой которых находилась платформа для солдат. Требовалось определить условия устойчивости таких судов. При решении этого вопроса Стевин исходил из положений своей гидростатики и дал такое заключение: «...Когда вершина тела нагру-

---

[1] С. Стевин, Начала гидростатики. Сб. «Начала гидростатики», Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 198.

жена и центр тяжести его лежит выше центра тяжести соответствующего объема воды, то тело опрокидывается (если только его ничто не удерживает) и занимает такое положение, при котором его центр тяжести располагается на вертикальной линии, проходящей через центр тяжести соответствующего объема воды, ниже последнего»[1].

Из сказанного следует, что если трюм судна нагружен, например, камнем или металлом, то центр тяжести *m* всего судна опустится ниже центра давления *n*, и как бы ни было наклонено судно — оно снова выпрямится. Это случай устойчивого равновесия (рис. 14, 1).

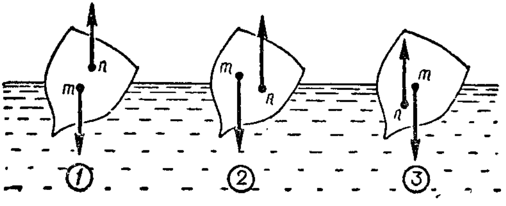

Рис. 14. Равновесие судна.

Если центр тяжести судна, например при нагрузке его палубы, переместится выше центра давления, то равновесие станет неустойчивым (рис. 14, 3), и судно опрокинется. Однако может быть и такой случай, что при некотором превышении центром тяжести судна центра давления судно все-таки сохранит устойчивость (рис. 14, 2).

Занимаясь исследованием давления внутри жидкости, Стевин прибегал к приему, который можно назвать мысленным опытом. Он представлял себе, будто бы некоторая часть находящейся в равновесии жидкости отвердела, что не меняет условий равновесия части, оставшейся в жидком виде.

Этим путем Стевин пришел к открытию так называемого «гидростатического парадокса», который обычно связывают с именем жившего позднее французского физика Паскаля.

Следуя за ходом мыслей Стевина, выделим мысленно в жидкости, находящейся в равновесии, несколько

---

[1] С. Стевин. Начала гидростатики. Сб. «Начала гидростатики», Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 198.

столбиков разнообразной формы, опирающихся на одинаковые по размерам площадки, лежащие на одной и той же глубине. Эти площадки испытывают одинаковое давление, так как в противном случае жидкость пришла бы в движение. Теперь представим себе, что вся жидкость вне выделенных мысленно столбиков затвердела. Оставшаяся жидкость давит на основания с той же силой, как и ранее. Следовательно, давление на дно образовавшихся сосудов, несмотря на их разнообразную форму, будет одинаковым. Сила давления на дно сосуда зависит только от площади дна и высоты уровня данной жидкости.

Это открытие Стевин проверил с помощью опытов, в которых дном разнообразных по форме сосудов служила чашка весов.

Подобным же способом Стевин установил закон равновесия жидкости в сообщающихся сосудах. Он мысленно выделял в жидкости изогнутый канал произвольной формы, концы которого выходили на поверхность. Если бы вся жидкость вне воображаемого канала затвердела, то условия равновесия оставшейся в канале жидкости не изменились бы, т. е. она стояла бы в образовавшихся сообщающихся сосудах на одной высоте.

Свои теоретические выводы Стевин применил к решению технических задач. Он определил, например, силу давления воды на вертикальные ворота закрытого шлюза. Она равна весу столба воды, площадью основания которого служит площадь ворот, а высотой — половина глубины канала.

Работами Стевина было завершено развитие античной статики. В дальнейшем на первое место выступили задачи динамики.

8. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ДВИЖЕНИЯ БРОШЕННОГО ТЕЛА

В XIV—XVI вв. началось изучение закономерностей движения тел. Оно было связано с введением огнестрельного оружия и с решением проблемы движения планет.

С усовершенствованием пушек и с увеличением дальности стрельбы возникла необходимость предугадать траекторию полета снаряда, чтобы обеспечить попадание в цель. Механики средних веков, как и при возникновении других задач, обратились к науке античного времени.

Однако в арабских переводах и в подлинниках древних рукописей не нашлось рационального исследования этого вопроса.

Движение брошенного тела было довольно сложной проблемой динамики. Решение ее требовало понимания роли свободного падения и знания принципа сложения движений.

Средневековые ученые, естественнонаучный багаж которых заключался в аристотелевской физике, полагали, что падение снаряда начинается только по окончании полета в горизонтальном направлении и происходит по вертикали. Причиной такого заблуждения было незнание принципа независимости (суперпозиции) движений в двух различных направлениях. Если тело совершает одновременно два движения, то достигнутый им конечный пункт не зависит от того, совершались ли оба движения одновременно или в какой угодно последовательности одно за другим.

Первым, кто нашел принцип построения траектории снаряда, был итальянский математик-самоучка *Никколо Тарталья* (1499—1552).

Тарталья не успел научиться в школе даже грамоте, так как по бедности вынужден был ее оставить. Но чувствуя большую склонность к математике, он самостоятельно изучил арифметику и геометрию, проявив блестящие математические способности. Уже в возрасте 24 лет он нашел способ определения числа возможных комбинаций в игре костями, а позднее решил частный случай кубического уравнения[1]. Он выступал на математических диспутах и был одним из известнейших математиков своего времени.

Поселившись в Вероне, Тарталья в качестве частного «арифметика» давал советы мастерам-ремесленникам, инженерам, артиллеристам, архитекторам и купцам. Позднее он переселился в Венецию, где продолжал ту же деятельность.

---

[1] Джеронимо Кардано, которому приписывалось решение кубического уравнение, сам признавал, что ранее его это решение было найдено Тартальей. См., например: Г. Г. Цейтен, История математики в XVI и XVII вв., пер. с немецкого, 1938.

Еще в Вероне к нему обращались артиллеристы с вопросом, под каким углом нужно произвести выстрел, чтобы снаряд пролетел наибольшее расстояние,— задача, которая привлекла внимание еще Леонардо да Винчи.

Тарталья дал правильное ее решение: наибольшее расстояние снаряд пролетает, будучи выброшен под углом 45° к горизонту.

Современники Тартальи были уверены, что при выстреле снаряд летит в цель по прямой линии. Тарталья же знал, что вследствие действия тяжести снаряд отклонится от нее. В сочинении «Новая наука», вышедшем в свет в 1537 г., он уже ввел понятие о «смешанном» движении снаряда по криволинейному пути, но вида кривой определить не смог. По-видимому, Тарталья опасался еще полного разрыва с традиционными воззрениями. Он писал, что по выходе из пушки ядро летит прямолинейно, а затем описывает дугу окружности большого радиуса и падает вертикально по касательной к ней.

Хотя данное Тартальей математическое решение проблемы траектории снаряда представляет лишь первое приближение к действительности, нельзя не удивляться его прозорливости, так как непосредственно заметить действие тяжести на снаряд невозможно.

Самоучка Никколо Тарталья стал во главе школы итальянских математиков XVI в. Его ученики и последователи развивали экспериментально-математический метод в механике. Из числа их наиболее замечателен венецианец *Джованни Бенедетти* (1530—1590). Он, как и его наставник, не получил систематического школьного образования. Прочитав под руководством Тартальи четыре книги Евклида, Бенедетти продолжал изучение математики и механики самостоятельно. На 23-м году жизни он уже опубликовал собственное математическое исследование, содержащее оригинальные доказательства геометрических теорем Евклида.

Как механик и физик, Бенедетти отличался бóльшей последовательностью, чем его учитель. Он уже настойчиво указывал на ошибочность утверждения Аристотеля, будто брошенный камень движется благодаря подталкиванию воздуха, врывающегося в пустоту позади камня. Он утверждал, что воздух не подталкивает, а задерживает летящий камень. Наблюдая куски грязи, отлетающие от быстро вращающегося колеса, Бенедетти объяснял это явление стремлением тела двигаться прямолинейно. Следовательно, он имел некоторое представление об инерции движущихся тел, введенное в механику позднее Галилеем.

Бенедетти утверждал, что тела разного веса падают с одной и той же высоты на землю с одинаковой скоростью. Однако он прибегал еще к чисто логическим объяснениям этого явления.

Ему не удалось привлечь внимание современников к своим идеям. Его главное сочинение по физике, в котором механике посвящена особая глава, было опубликовано лишь в конце жизни автора. Оно замалчивалось учеными того времени, по-видимому, потому, что Бенедетти был известен как искусный диалектик, и аристотелианцы избегали вступать с ним в открытые споры.

На примере Тартальи и Бенедетти мы видим, как робки были еще попытки рационального исследования движения тел. Отрицая умозрительные методы Аристотеля, предшественники Галилея еще в очень большой степени находились под влиянием идей античной натурфилософии. Для ниспровержения аристотелианства в механике нужен был гений, который поставил бы научные исследования в этой области на экспериментальную основу, мог бы данные опыта обобщить в теорию и вывести законы движения, пригодные для применения их в технической практике.

Таким исключительным гением и был Галилей, сочетавший в себе талант инженера-практика с глубокомыслием философа.

МЕХАНИКА ФЕОДАЛЬНОГО ПЕРИОДА (XVI—XVIII вв.)

9. РАЗВИТИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Стевин решил частный случай одного из самых общих принципов механики — принципа сложения сил. Этот принцип основан на предположении, что если на материальную точку одновременно в разных направлениях действуют две силы, то они эквивалентны одной силе, сообщающей телу такое же движение, как обе данные силы.

Принцип сложения сил носит динамический характер, но может быть применен и к вопросам статики при рассмотрении частного случая динамики, когда равнодействующая сил равна нулю. Переходом к динамике является и принцип возможных перемещений.

Динамический характер нового принципа совершенно очевиден, так как он основан на представлении о перемещении тел. Как бы ни было мало перемещение, но изучение его — предмет динамики.

Однако механики старой школы не понимали этого.

Современник Стевина *Галилео Галилей* (1564—1642), заложивший основы динамики, вполне отдавал себе отчет в динамическом характере принципа возможных перемещений. Поэтому он сумел применить его к выводу условий равновесия тела на наклонной плоскости.

Пусть большой груз на наклонной плоскости уравновешен малым, висящим на конце веревки, переброшенной через блок. Возможное перемещение большого груза вдоль наклонной плоскости равно перемещению малого груза по вертикали; поэтому произведения грузов на пройденные ими пути не равны между собой, что как будто противоречит принципу возможных перемещений.

Галилей выяснил, что в этом случае перемещение большого груза нужно измерять не вдоль наклонной плоскости, а по вертикали. Причем оно оказывается во столько раз меньше перемещения по вертикали малого груза, во сколько раз малый груз меньше большого. Если принять во внимание это разъяснение, никакого противоречия с принципом возможных перемещений не будет.

Галилей установил общий принцип, согласно которому две силы уравновешивают друг друга, если их моменты, приводящие машину в движение в противоположных направлениях, равны между собой. При этом под моментом он подразумевал произведение силы на возможную скорость.

Принцип возможных перемещений был применен Галилеем и в гидростатике. Этот раздел механики получил развитие в работе Галилея «Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и о тех, которые в ней движутся», изданной в 1612 г. Независимо от Стевина Галилей проверил закон Архимеда и вывел условия равновесия плавающих тел, доказав ошибочность взглядов аристотелианцев. Последователи Аристотеля утверждали, будто плавание тела зависит от его формы. В доказательство этого они приводили пример тонких металлических пластинок и игл, которые остаются на спокойной поверхности воды, если их осторожно положить на нее.

Это явление не могло получить тогда правильного объяснения, так как оно зависит от поверхностного натяжения, изученного только в XVIII в. Однако Галилей сделал решающий опыт, доказавший правоту его воззрений на причину плавания тел: плавающее тело поддерживается давлением жидкости и плавание зависит от отношения удельных весов тела и жидкости, в которую оно погружено.

Опыт Галилея заключался в том, что погруженный в воду восковой шар с кусочком свинца внутри тонул, но когда в воде растворяли соль и плотность ее увеличивалась, то шар всплывал, хотя форма его не менялась.

Стремясь объединить гидростатику со статикой твердых тел, Галилей применил к выводу условий равновесия плавающих тел принцип возможных перемещений при описании следующего опыта.

Пусть плавающее тело цилиндрической формы находилось в широком сосуде, наполненном водой. Затем его поместили в узкий цилиндрический сосуд, между стенками которого и телом осталась лишь небольшая щель, и налили столько воды, что она покрыла тело до той же высоты, как и в широком сосуде. Тогда тело в узком сосуде плавало, возвышаясь над уровнем окружающей его воды на столько же, на сколько оно возвышалось в широком сосуде. Этот опыт, не кажущийся удивительным в наше время, был большой неожиданностью для современников Галилея, придерживавшихся еще мнения Аристотеля, будто корабль лучше поддерживается водой в большом бассейне, чем в малом. Галилей со свойственной ему иронией замечает: «Корабль также хорошо плавает в 10 бочках воды, как в океане» («Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и о тех, которые в ней движутся»).

На основе принципа возможных перемещений Галилей объяснял и равенство уровней жидкости в двух сообщающихся сосудах разного диаметра, сравнивая равновесие жидкости в этом случае с рычагом, на котором большой груз уравновешивается малым.

В сообщающихся сосудах, по его выражению, «поднятие малого количества воды (в узком сосуде.— *Б.* и *М.*) сопротивляется медленному опусканию большого количества» (в широком сосуде.— *Б.* и *М.*) и потому «момент скорости движения одного движущегося тела возмещает момент тяжести другого». Галилей применял термин «момент» в широком смысле. В данном случае он подразумевал под этим словом произведение веса тела и скорость его движения.

Дальнейшее развитие гидростатика получила в работах французского ученого *Блеза Паскаля* (1623—1662). Паскаль обладал редким математическим талантом. В возрасте 16 лет он уже написал работу о конических сечениях, не потерявшую своего значения даже в наше время, а позднее опубликовал еще несколько математических работ и изобрел счетную машину.

В своих гидромеханических исследованиях Паскаль, следуя примеру Галилея, широко применял принцип возможных перемещений. Пользуясь этим принципом, он открыл гидростатический парадокс, не зная о сделанном ранее открытии Стевина, и построил прибор для демонстрации этого явления — так называемый «сосуд Паскаля» (рис. 15), вследствие чего открытие гидростатического парадокса нередко приписывалось ему.

Паскаль подробно рассмотрел в «Трактате о равновесии жидкостей» проблему передачи давления жидкостью и пришел к заключению, 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». Примером такой машины, как указывал Паскаль, служат два сообщающихся сосуда разных диаметров, плотно закрытые поршнями. Грузы, давящие на эти поршни, уравновешиваются в том случае, если их веса пропорциональны площадям поршней. При перемещении поршней соблюдается принцип возможных перемещений так же, как при равновесии тел на рычаге или блоке. По поводу этого Паскаль писал: «Надо признать, что в этой новой машине проявляется тот же постоянный закон, который наблюдается и во всех прежних — рычаге, блоке, бесконечном винте и так далее — и который заключается в том, что путь увеличивается в той же пропорции, как сила».

Разъясняя это положение, Паскаль продолжал: «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 площади большого.— *Б.* и *М.*). В самом деле, этот толчок происходит вследствие непрерывности воды, соединяющей

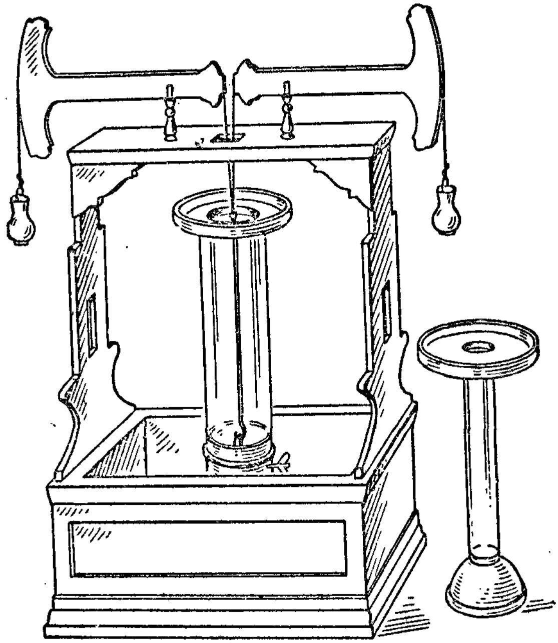

Рис. 15. Сосуд Паскаля.

один поршень с другим и обусловливающий то, что один поршень не может двигаться, не толкая другого, поэтому, когда малый поршень подвинется на один дюйм, то вода, которую он вытеснит, 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 работах по гидростатике исследователей следующего века.

С открытием в XVII в. давления атмосферы стало возможным правильно объяснить действие всасывающего насоса — проблема, перед которой остановился даже проницательный ум гениального Галилея. Галилей полагал, что вода поднимается вслед за поршнем насоса, так как природа «боится пустоты». Но в то же время, объясняя результаты опытов, он указывал на проявление этой «боязни» лишь до высоты 43,5 локтя (около 10 *м*): выше водяной столб не поднимается.

У *Торричелли* (1608—1647) возникла мысль выяснить на опыте роль удельного веса жидкости при заполнении пустоты. Проверку этой мысли он поручил в 1643 г. ученику Галилея *Винченцо Вивиани,* который выбрал для опыта очень тяжелую жидкость — ртуть.

Вивиани наполнил ртутью запаянную с одного конца стеклянную трубку и, зажав открытый конец пальцем, погрузил ее этим концом в чашку со ртутью. Ртутный столб в трубке, опустившись до высоты 30 дюймов (1 дюйм = 25,4 *мм*), остановился. Над ним же осталось не заполненное ртутью пространство.

Весьма интересным был тот факт, что высота ртутного столба оказалась во столько же раз меньше высоты водяного столба, во сколько раз ртуть тяжелее воды. Следовательно, водяной и ртутный столбы производят одинаковое давление на единицу поверхности жидкости.

Из подобных же опытов, повторенных затем в различных вариантах Торричелли, следовало: в трубке всегда удерживается столб жидкости такой высоты, что его давление равно тому, которое производит столб ртути высотой 30 дюймов. Это открытие сделало ясным, что «боязнь пустоты» — нелепость, а наблюдаемое явление объясняется давлением воздуха на поверхность жидкости в чашке.

Этими опытами был установлен факт давления воздуха на все тела и на земную поверхность с силой около 15 фунтов на квадратный дюйм. Но всем оставалось непонятным, как люди и животные могут выдерживать столь большое давление, не будучи раздавленными им. Поэтому атмосферное давление получило всеобщее признание только после исследований Паскаля и немецкого инженера Отто Герике.

Паскаль, повторяя опыты Торричелли, решил выяснить, понижается ли уровень ртути в трубке при уменьшении давления атмосферы. С этой целью он поручил измерить атмосферное давление у подножия и на вершине горы, полагая, что во втором случае толщина слоя атмосферы меньше и столб ртути, удерживаемый ее давлением, должен быть ниже.

Опыт подтвердил предположение Паскаля, который писал, что у подножия горы воздух оказывает большее давление, чем на вершине ее, меж тем как нет никаких оснований предполагать, чтобы природа испытывала большую боязнь пустоты внизу, чем вверху.

Большое значение для развития механики газов имели опыты и изобретения *Отто Герике* (1602—1686), бургомистра Магдебурга, описание которых было изложено им в сочинении, вышедшем в свет в 1672 г.

Своими опытами Герике хотел разрешить служивший предметом споров натурфилософский вопрос: может ли существовать в природе пустое пространство? В процессе постановки опытов он наблюдал неоспоримое проявление атмосферного давления.

Сначала Герике пытался получить пустое пространство в хорошо просмоленной бочке, из которой он выкачивал воздух с помощью изобретенного им для этой цели насоса. Но воздух проникал через поры древесины и опыт не удался.

Тогда Герике повторил тот же опыт с медными полушариями, плотно прилегавшими одно к другому пришлифованными краями, смазанными для герметичности салом. Когда воздух был выкачан, то восемь лошадей не смогли оторвать одно полушарие от другого. При открывании же крана трубки, соединявшей полушария с атмосферой, воздух врывался внутрь их и они легко отделялись одно от другого.

Это явление, столь понятное в наше время, вызвало тогда чрезвычайное удивление, выразившееся, например, в словах одного из противников новой науки — профессора Шотта, который писал: «Я, не колеблясь, заявляю, что в этой области никогда не видел ничего более поразительного. И я думаю, что под солнцем никогда еще с сотворения мира не наблюдалось ничего подобного, а тем менее что-нибудь более удивительное» [1].

Герике повторил опыт, подтвердивший, что давление

[1] Ф. Даннеман, История естествознания, т. II, ОНТИ, 1936.

атмосферы может поддержать водяной столб высотой не более 32 футов. Он выкачивал воздух из медного шара с отходившей от него трубкой и, погрузив затем конец трубки в чан с водой, открывал кран. Вода через трубку заполняла весь шар. *Удлиняя трубку и поднимая все выше шар*, Герике убедился в следующем: когда столб воды достигал высоты около 32 футов, то его подъем прекращался. Он даже заметил, что высота водяного столба не оставалась постоянной: она становилась то немного выше, то ниже, в зависимости от погоды.

Исследования Стевина, Галилея, Паскаля и Герике заложили основу, на которой развилась механика жидкостей и газов в XVIII в.

10. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ПРИНЦИПОВ СТАТИКИ

Французский математик и механик *Роберваль* (1602—1675), член Парижской академии наук, занимавшийся решением проблемы о равновесии приложенных к точке трех сил, изобрел особую конструкцию весов.

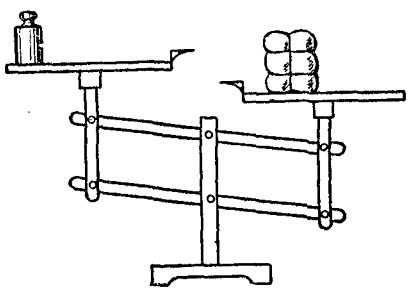

Рис. 16. Схема весов Роберваля.

Весы Роберваля служат иллюстрацией применения принципа возможных перемещений. Они состоят из двух горизонтальных рычагов одинаковой длины (рис. 16), вращающихся в вертикальной плоскости. Концы рычагов соединены шарнирами с вертикальными брусками, на которых укреплены чашки весов. При перемещении рычагов бруски сохраняют вертикальное положение. Два равных груза, положенные на чашки, сохраняют равновесие, независимо от их положения на чашках.

Это на первый взгляд парадоксальное явление объясняется тем, что независимо от местоположения грузов на чашках весов *они перемещаются на равные расстояния* и при этом соблюдается принцип равенства возможных перемещений.

Современные мостовые весы также представляют собой различные конструкции весов Роберваля. Мостовые весы не должны менять показаний при перемещении груза по их платформе. Это условие выполняется, если возможное перемещение платформы поступательно. Таким образом, связи механизма весов должны обеспечивать платформе вертикальное поступательное движение, как это имеет место в весах Роберваля.

Одна из конструкций мостовых весов (системы Квинтенца) схематически представляет собой рычаг (рис. 17),

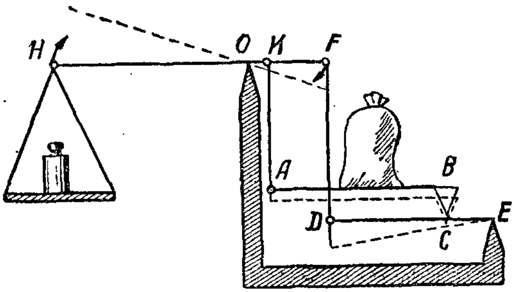

Рис. 17. Схема мостовых весов.

подпертый в точке O. К концу H рычага подвешена чашка с гирями, а к концу F — конец рычага DE, вращающегося около точки E. Между точками O и F верхнего рычага при помощи тяги AK подвешен конец платформы AB.

Точки опоры рычагов выбраны так, что $CE : ED = OK : OF$. При вращении рычага HF около точки O (в сторону, показанную стрелкой) точка A опускается на такое же расстояние, как и точка C, в которой рычаг AB опирается на DE. Поэтому платформа AB, перемещаясь, остается всегда параллельной сама себе, и поставленное выше условие выполняется.

Другой пример приложения принципа возможных перемещений — дифференциальный полиспаст (рис. 18). Этот механизм состоит из двух блоков несколько различающихся диаметров. Блоки закреплены на одной оси вращения. Бесконечная цепь охватывает их последовательно, переходя с одного на другой. Груз Q подвешен к петле, обвивающей как большой, так и малый блоки.

Если сила, например руки, приложенная к цепи, заставляет вращаться дифференциальный блок, то большой блок поднимет вверх бо́льший кусок цепи, чем спустит на другой стороне малый блок. Точка приложения силы P, поднимающей груз, при полном обороте большого блока пройдет путь, равный длине его окружности. Груз же поднимается лишь на высоту, равную половине разности длин окружностей большого и малого блоков.

В соответствии с принципом возможных перемещений произведение силы на путь, пройденный точкой ее приложения, равно произведению веса груза на пройденный им путь. Следовательно, выигрыш в силе определяется отношением полу-

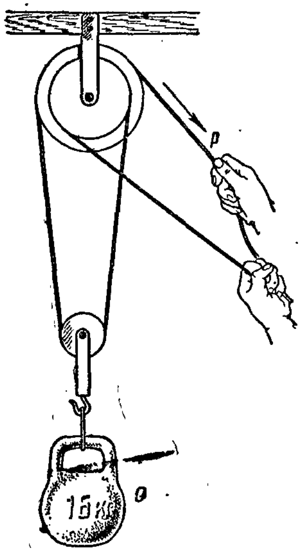

Рис. 18. Дифференциальный полиспаст.

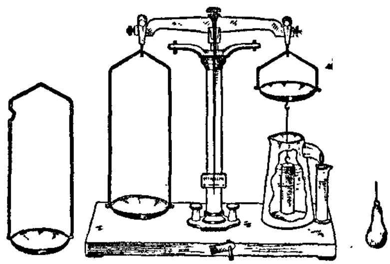

Рис. 19. Гидростатические весы.

разности длин окружностей блоков к длине окружности бо́льшего из них. При небольшой разнице в диаметрах и крупных размерах блоков выигрыш в силе может быть сделан очень значительным.

Галилей, сочетавший по традиции средних веков теоретические исследования с инженерной практикой, изготовил гидростатические весы, применяемые до настоящего времени для определения относительной плотности тел (рис. 19).

В годы пребывания в Падуе (1592—1610) Галилей изобрел гидравлический пресс, на который получил патент в Венеции. Эта машина (рис. 20) состояла из широкого и узкого цилиндров, соединенных трубкой. Узкий цилиндр был снабжен клапаном, через который при подъеме поршня засасывалась вода из бассейна. При опускании же поршня вода перегонялась по трубке в широкий цилиндр и приподнимала находящийся в нем поршень, который сжимал подвергаемый прессованию предмет.

При жизни Галилея его пресс не получил широкого распространения, но спустя два века он уже применялся в Англии для продавливания дыр в металлических листах, для испытания паровых котлов на давление и других целей.

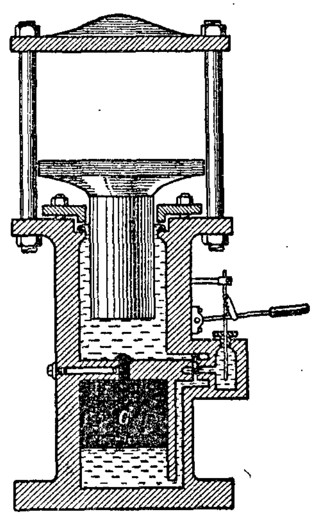

Рис. 20. Гидравлический пресс.

Известный с античного времени всасывающий насос был применен Отто Герике для выкачивания воздуха. В дальнейшем для этой цели Герике сконструировал специальный воздушный насос. Его воздушный насос (рис. 21) состоял из цилиндра *cc*, в котором перемещался поршень, плотно прилегавший к его стенкам. Шток поршня был сделан в виде зубчатой рейки, совершающей возвратно-поступательное движение при вращении шестерни *r* от рукоятки *9*.

Цилиндр имел трехходовый кран *a* и посредством трубки был соединен с тарелкой, на которой установлен стеклянный колокол *R*.

Трехходовый кран позволял соединять в положении I колокол *R* с наружным воздухом *L* и с цилиндром *S*. В положении II колокол соединялся только с цилиндром, в III — цилиндр был соединен с наружным воздухом и в IV — с наружным воздухом соединялся колокол.

В I положении крана колокол и цилиндр были наполнены воздухом при атмосферном давлении. Придвинув к крану поршень, поворачивали кран в положение II, изолируя цилиндр и колокол от атмосферы. При отодвигании поршня от крана расширявшийся в колоколе воздух переходил частично в цилиндр. Тогда поворачивали кран в положение III и движением поршня удаляли воздух из цилиндра. Затем опять ставили кран в положение II, чтобы при движении поршня часть воздуха из-под колокола переходила в цилиндр. Повернув кран в положение III, снова удаляли воздух из цилиндра в атмосферу. Повторяя эту операцию много раз, разрежали воздух под колоколом. При каждом положении III полость крана наполнялась атмосферным воздухом. Это — «вред-

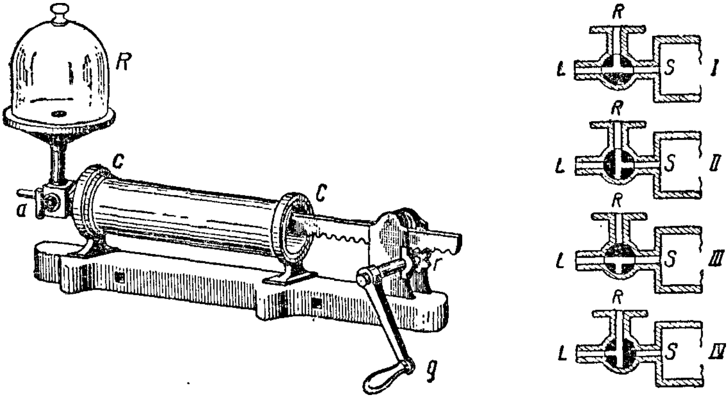

Рис. 21. Воздушный насос Отто Герике.

ное пространство» насоса, не позволяющее довести давление под колоколом меньше $\frac{J}{R+S}$ 760 *мм* рт. ст., где J — объем «вредного пространства», R — объем колокола, S — объем цилиндра.

11. РАЗВИТИЕ ОСНОВ ДИНАМИКИ

Гениальный польский мыслитель *Николай Коперник* (1473—1543) показал, что все планеты, и в их числе Земля, обращаются вокруг Солнца.

В основе системы Коперника лежало допущение, что некоторые из наблюдающихся движений планет представляют собой лишь кажущиеся — параллактические — перемещения, вызываемые обращением самой Земли вокруг Солнца. Суточное же вращение небесной сферы есть также кажущееся движение — отражение вращения земного шара вокруг собственной оси.

Еще в ранней своей работе — «Малый Комментарий Николая Коперника к его гипотезам небесных движений»,— относящейся (по новым данным) к 1515 г., Коперник писал:

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

В эпоху Коперника еще было общепризнанным аристотелианское деление движений на «естественные» и «насильственные». Поэтому перед Коперником и его последователями сразу же встал вопрос: движение Земли — естественное или насильственное?

Коперник утверждал, что, «если предполагать вращение Земли, надо непременно признать, что это движение естественное, а не насильственное». Таким же «естественным», т. е. совершаемым «по инерции», он считал и движение Земли вокруг Солнца.

Движение планет вокруг Солнца уже могло стать предметом исследования механики, но во времена Коперника еще не были заложены основы динамики. Лишь почти через сто лет после опубликования бессмертного творения Коперника «Об обращениях небесных сфер» появились «Беседы» Галилея с изложением в популярной форме законов движения тел.

Галилей еще в детстве проявил недюжинные способности экспериментатора. Его склонность к опытной науке не могла найти удовлетворения в Пизанском университете, куда он поступил для получения образования.

В возрасте 20 лет Галилей покинул университет и обратился к изучению элементарной математики и механики, которые преподавал ему частным образом *Остилио Риччи,* читавший лекции в Флорентинской художественной академии.

Риччи принадлежал к эмпирической школе Тартальи. Он преподавал разделы математики и механики, имеющие прикладной характер. На его уроках разрешались задачи баллистики, военной и гражданской архитектуры и другие практические вопросы, требовавшие знаний по механике и математике, чуждых университетской науке того времени.

Но Риччи не мог дать Галилею глубоких математических познаний. Он познакомил его лишь с приложениями математики к решению довольно простых вопросов техники. Этим и определилось направление первых исследований Галилея, написавшего уже в 1585 г. работу об определении центра тяжести.

В этой работе Галилей применил чисто геометрический метод в духе Архимеда, чем снискал благосклонное отношение к ней влиятельного ученого Гвидо Убальди, по рекомендации которого Галилей получил кафедру математики и астрономии в Пизанском университете.

Университетские занятия — преподавание геометрии по Евклиду и элементарной астрономии по Птолемею — не имели никакого отношения к его научной деятельности этого периода, посвященной исследованию проблем механики.

Вопросы о движении и равновесии тел возникали у Галилея в процессе его технических работ. Решая проблемы баллистики, он пришел к исследованию законов свободного падения.

Можно предполагать, что, еще будучи студентом в Пизе, Галилей был сознательным противником механики Аристотеля. Несомненно, что с 1689 г., читая лекции в университете Пизы, Галилей уже открыто возражал против учения Аристотеля о падении тел.

Последователи Аристотеля утверждали, будто вдвое большая сила тяжести должна сообщить телу и вдвое большую скорость падения. В действительности же это мнение Аристотеля резко расходилось с повседневным опытом. Поэтому проблема свободного падения привлекала в эпоху Галилея внимание не только исследователей, но и людей, по своим занятиям стоявших далеко от науки. Ее обсуждали в «академиях», в научных беседах и диспутах, происходивших при дворах многочисленных итальянских герцогов, и даже на паперти собора Флоренции, куда собирались по вечерам жители города.

Опровергая мнение Аристотеля о свободном падении, Галилей прибегал еще к чисто логическим рассуждениям: «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; и если одна фунтовая гиря падает на 16 футов в секунду и другая фунтовая гиря на столько же, то эти два груза не могут падать вдвое скорее, если их связать друг с другом так, чтобы они образовали одно двухфунтовое тело»[1].

Сравнение падающих тел с бегущими лошадьми формально и не могло приниматься всерьез таким глубоким мыслителем, каким был Галилей. Что же касается рассуждения о связанных двух грузах, то эта аргументация Галилея не была умозрительной в аристотелианском духе. Она основывалась на повседневном опыте, на что указывал и сам Галилей в следующем рассуждении: «Мы чувствуем тяжесть на плечах, когда сопротивляемся движению, к которому стремится давящая тяжесть; но если бы мы опускались с такой же скоростью, с какой перемещается свободно падающий груз, то каким образом тяжесть могла бы давить на нас? Не видите ли вы, что это подобно тому, как если бы мы хотели поразить копьем кого-либо, кто бежит впереди нас с равной или большей скоростью. Выведите из этого заключение, что при свободном и естественном падении малый камень не давит на большой и, следовательно, не увеличивает его веса, как то бывает при покое». («Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению», Гостехиздат, 1943.)

Галилей не ограничивался логическими выводами, хотя они и были основаны на опыте и наблюдении. Для доказательства независимости скорости свободного падения от веса тела он прибег к экспериментам, для которых представляла большие удобства наклонная башня Пизы.

Правда, некоторые историки сомневаются, производил ли Галилей опыты, находясь еще в Пизе, но метод всех исследований этого ученого свидетельствует о внутренней необходимости для него экспериментальной проверки теоретических выводов.

С наклонной башни Пизы или, может быть, с какой-либо другой высоты Галилей сталкивал одновременно шары разных размеров и разного веса и наблюдал их одновременное падение на землю. (Незначительная разница во времени падения была вызвана сопротивлением

---

[1] Лакур и Аппель, Историческая физика, т. I, изд. Матезис, Одесса, 1908.

воздуха, сильнее отражавшемся на падении небольших тел.)

Эти наблюдения, однако, еще не убедили аристотелианцев. Схоласты казуистически оспаривали их результаты, указывая на незначительную разницу в скорости падения больших и малых тел. Они утверждали, что если бы шары были сброшены с высоты тысячи футов, то разница стала бы еще бóльшей.

Но Галилей был не просто эмпириком, а экспериментатором, могущим варьировать условия своих опытов. Для доказательства независимости скорости падения тел от их веса он использовал наклонную плоскость.

Движение шариков, скатывающихся по наклонной плоскости, происходит под действием силы тяжести и потому должно быть аналогично свободному падению, отличаясь от него только сравнительной медленностью.

Опыты Галилея с наклонной плоскостью показали, что скорость скатывания шара действительно не зависит от его веса.

В качестве доказательства независимости скорости свободного падения от веса тела Галилей рассматривал и изохронность колебаний маятников равной длины, сделанных из различных материалов.

Еще студентом, наблюдая качания люстр в соборе Пизы, Галилей убедился, что, независимо от своего веса, люстры, висевшие на цепях равной длины, совершали колебания в одинаковый период времени (для измерения времени он пользовался ударами своего пульса).

Так как движение маятника по дуге круга есть падение под влиянием силы тяжести, направление которого меняется действием нити, то изохронность колебаний маятников разного веса, но одинаковой длины свидетельствовала о независимости скорости падения от веса тел.

Установление Галилеем одновременности падения тел разного веса имело огромное значение для формирования нового мировоззрения в механике. Одновременность падения тел свидетельствовала о пропорциональности веса, как силы, действующей на тело, его массе.

Одновременность свободного падения (т. е. равенство ускорений) тел разного веса могла быть установлена только путем опыта, и Галилей посвя ил немало труда опытному доказательству этого факта.

Еще в заметках к работе «О движении» Галилей изложил свои воззрения на метод физических исследований в словах: «Я буду пользоваться таким методом, чтобы требующее доказательства выводилось из доказанного; и я никогда не буду класть в основу то, что еще нужно доказать, а лишь истинное. Этому методу научили меня мои математики; но им недостаточно пользуются некоторые философы, которые обычно, 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»[1].

Опыт и наблюдение позволили Галилею ввести в механику основной принцип динамики — инерцию движения.

Понятие об инерции движения под влиянием наблюдения явлений природы, по-видимому, уже созревало в сознании многих мыслителей. Некоторые, например Бенедетти, в неясной форме даже высказывали его в своих работах.

Не удивительно, что Галилей, знакомый с трудами своих предшественников, даже в раннем сочинении — «Учение о движении под действием тяжести» (1609) — уже подразумевал принцип инерции движения. Без него он не мог бы вывести законов свободного падения тел.

Быть может в юности Галилей даже считал инерцию движения общеизвестной (случаи, когда ученые недооценивали своих открытий, наблюдались в истории науки), так как только в более поздних работах он сделал попытку объяснить этот принцип. «На плоскости наклонной,— писал он,— движущееся тело самопроизвольно опускается, двигаясь с непрерывным ускорением, так что требуется применить силу для того, чтобы удержать его в покое... А теперь скажите мне, что произошло бы с тем же движущимся телом на поверхности, которая не поднимается и не опускается?» И далее:

«...если здесь нет причины для замедления, то тем менее может находиться здесь причина для покоя, и движение будет продолжаться столь долго, сколь велика длина такой поверхности без спуска и подъема» («Диалог о двух главнейших системах мира»).

---

[1] Л. Ольшки, История научной литературы на новых языках, т. III, Гостехтеоретиздат, 1933, стр. 109.

Еще более определенно Галилей сформулировал принцип инерции движения в «Беседах и математических доказательствах о двух новых науках»: «Когда тело движется по горизонтальной плоскости, не встречая никакого сопротивления движения, то... движение его является равномерным и продолжалось бы бесконечно, если бы плоскость простиралась в пространстве без конца».

Без знания инерции движения не могла быть создана динамика.

Неуверенные высказывания предшественников Галилея не лишают его чести считаться основоположником нового воззрения в механике, согласно которому равномерное прямолинейное движение, как и покой, представляет собой состояние тела, не подверженного действию сил. Нельзя, однако, не отметить, что Галилей в своем понимании инерции исходил из учения Коперника о «естественности» кругового движения Земли. Поэтому равномерное движение тел по большому кругу на поверхности Земли он считал движением по инерции.

Понятие о силе в современном значении этого слова было еще не известно Галилею. Причину движения Галилей называл «импульсом», «моментом» или «энергией» — терминами, имеющими теперь самостоятельный смысл в механике,— причем этот фактор движения не входил в его математические расчеты.

Галилей не вводил в свои расчеты силу, как формальную причину движения, избегая возврата к «причинам» и «свойствам» аристотелевской физики, но его занимала мысль о силе удара и ее измерении. В целях нахождения меры этой силы Галилей произвел следующий опыт: на конце коромысла весов он подвесил одно под другим два ведра. Верхнее ведро было наполнено водой, которая могла вытекать через клапан в его дне, попадая при этом в нижнее ведро. Ведра были уравновешены противовесом. Открывая клапан, Галилей ожидал, что струя воды, ударяющая в дно нижнего ведра, заставит его опуститься и для восстановления равновесия придется добавить груз на другом конце коромысла. В действительности же в первый момент, когда был открыт клапан, плечо с противовесом немного опустилось, как будто ведра стали легче; когда же струя ударилась в дно нижнего ведра, равновесие восстановилось.

Сравнивая давление и удар, производимые телом одной и той же массы, Галилей пришел к заключению, что «сила» (энергия) удара бесконечно велика по сравнению с давлением, при котором скорость равна нулю. Поэтому он называл вес покоящегося тела «мертвым весом».

Проблема удара, как проблема взаимодействия системы тел, была еще слишком сложна для того, чтобы сделать плодотворные выводы из этого опыта.

Являясь прекрасной иллюстрацией сохранения количества движения в системе, изолированной от действия внешних сил, этот опыт не дал возможности измерить действие удара.

Хотя по существу удар не отличается от других механических сил, но он действует в течение очень короткого промежутка времени и относится к числу так называемых мгновенных сил.

Вследствие кратковременности действия удара для его измерения не могут быть применены весы, динамометр и тому подобные приборы; невозможен и динамический метод, при котором величина силы принимается пропорциональной сообщаемому ею ускорению.

В результате действия удара покоящееся тело приобретает некоторую скорость. Эта скорость может быть измерена. Зная скорость тела, можно рассчитать количество движения, которым обладает тело после удара. За меру силы удара в современной механике и. принимают количество движения, сообщенного им покоящемуся телу.

Галилей закладывал основы механики в эпоху, когда имелось лишь смутное представление об инерции движения, а в науке господствовали превратные представления аристотелианства. Заслуги Галилея как основоположника современной динамики огромны и общепризнаны в истории физики. Напрасны попытки некоторых иностранных авторов, идеологически связанных с римско-католической церковью, например французского физика Пьера Дюгема, умалить заслуги Галилея. Никто не согласится, конечно, с Дюгемом, утверждающим, что «мнение, будто бы Галилей является создателем современной динамики, есть от начала и до конца сочиненная легенда».

Целеустремленность механических исследований Галилея, которыми он занимался в течение всей жизни, исключает возможность «случайности» его открытий в механике.

Если у Аристотеля, как отметил академик А. Н. Крылов, всегда появлялся вопрос «почему», то Галилей стремился к знанию того, «как» происходит то или иное явление[1].

Галилей был экспериментатором, а не эмпириком. Он знал, что показания опыта лишь приближенно совпадают с теорией, так как теория не учитывает различных посторонних влияний. Как теоретик Галилей не удовлетворялся только дедукцией даже из истинных положений и проверял свои выводы на опыте. Установленные Галилеем принципы динамики дали мощный толчок развитию экспериментально-математического метода в механике, применение которого в течение нескольких десятков лет подготовило почву для открытий Ньютона.

12. ОТКРЫТИЕ ЗАКОНОВ ДВИЖЕНИЯ БРОШЕННЫХ ТЕЛ

Исследование законов движения Галилей, как и его предшественники, начинал с геометрической теории, исходящей из очевидных положений, но полученные выводы он проверял экспериментом, результаты которого имели для него решающее значение.

Геометрический вывод законов движения был сделан Галилеем на основе принципов инерции и сложения движений.

Согласно принципу инерции движение, сообщенное телу, по своей природе равномерно и прямолинейно. Постоянное же действие силы в направлении движения увеличивает скорость тела.

Если телу сообщают движения одновременно в двух разных направлениях, то тело в каждое мгновение будет находиться в той точке пространства, куда оно пришло бы в результате последовательного движения сначала в одном, а затем в другом из этих направлений.

Во времена Галилея не было еще ясного представления о неравномерном движении. Поэтому ему в первую очередь пришлось дать определение этому механическому понятию.

---

[1] А. Н. Крылов, Галилей как основатель механики. Сб. «Галилео Галилей», изд. АН СССР, 1943, стр. 64.

«Прежде всего необходимо будет подыскать этому естественному явлению соответствующее точное определение и дать последнему объяснение. Хотя, конечно, совершенно допустимо представлять себе любой вид движения и изучать связанные с ним явления... мы тем не менее решили рассматривать только те явления, которые действительно имеют место в природе при свободном падении тел, и даем определение ускоренного движения, совпадающего со случаем естественно ускоряющегося движения».

Галилею, как и его предшественникам, было известно, что свободно падающее тело движется ускоренно. Но понятие об ускорении движения вовсе не казалось тогда таким простым, как в наше время. При введении его в механику Галилей встретился с большими трудностями и должен был подробно объяснить, возможно ли бесконечно медленное движение в начале свободного падения.

«Надлежит признать, что для промежутков времени, все более и более близких к моменту выхода тела из состояния покоя, мы придем к столь медленному движению, что при сохранении постоянства скорости тело не пройдет мили ни в час, ни в день, ни в год, ни даже в тысячу лет; даже в большее время оно не продвинется и на толщину пальца, — явление, которое весьма трудно себе представить, особенно когда наши чувства показывают, что тяжелое падающее тело сразу же приобретает большую скорость».

Галилей указывает и на замедление движения тела, брошенного вертикально вверх. Замедление происходит с той же постепенностью, но в обратном порядке.

Установив возможность ускорения свободного падения, Галилей сделал предположение о законе нарастания скорости: «Приращение скорости мы проще всего можем представить себе, как происходящее в соответствии с такими же равными промежутками времени. Умом своим мы можем признать такое движение единообразным и неизменно равномерно ускоряющимся».

Самым простым законом нарастания скорости было бы равномерное. Поэтому Галилей и сделал предположение о равномерном нарастании скорости свободного падения. Это предположение должно было или оправдаться на опыте, или же быть отвергнуто им. Если выведенные из него следствия согласуются с действительным падением тел, то оно правильно, и наоборот.

Первый закон свободного падения, принимаемого за равномерно ускоренное движение, Галилей получил путем следующих рассуждений: в момент начала падения тело (под «телом» он подразумевал материальную точку) неподвижно, т. е. скорость его движения равна нулю; по истечении секунды скорость будет численно равна ускорению; в дальнейшем под действием силы тяжести приобретаемая скорость будет возрастать в течение каждой секунды на величину ускорения; поэтому скорость свободно падающего тела в конце любого промежутка времени равна ускорению, умноженному на число секунд, прошедших с момента начала падения.

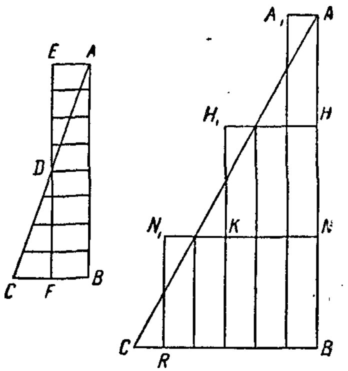

Рис. 22. Геометрический вывод закона свободного падения тел.

Непосредственно наблюдать изменение скорости свободного падения или его ускорение невозможно даже на слабо наклонной плоскости. Но пользуясь первым законом свободного падения, Галилей теоретически вывел второй закон, определяющий зависимость пройденного пути при равноускоренном движении от времени, который уже мог быть проверен наблюдением.

Сделанный Галилеем геометрический вывод этого закона замечателен своей наглядностью. Галилей отложил на вертикальной прямой линии AB равные отрезки, изображающие промежутки времени, а на перпендикулярах, восстановленных из концов этих отрезков, — скорости, приобретенные падающим телом, движущимся под действием силы тяжести (рис. 22). Линия AC, проведенная через концы перпендикуляров, оказалась прямой, наклон которой к горизонту определялся отношением величин отрезков, соответствующих промежуткам времени и изменениям скорости (ускорению).

Разделив пополам полученный отрезок прямой, Галилей провел через его середину линию EF, параллельную линии времен. Из чертежа он установил, что перпендикуляры, изображающие скорости в конце всех промежутков времени, продолженные до проведенной им линии, представляют собой скорость такого равномерного движения, при котором тело прошло бы то же расстояние, как и свободно падающее тело, за тот же промежуток времени.

Геометрические соображения показывали, что сумма скоростей, приобретенных свободно падающим телом в конце принятых промежутков времени в течение времени падения, равна сумме скоростей равномерного движения в течение того же времени. Причем скорость этого равномерного движения равна половине конечной скорости падающего тела. Отсюда следовало, что время, в течение которого свободно падающее тело проходит некоторое расстояние, равно тому времени, в течение которого оно прошло бы то же расстояние, двигаясь равномерно со скоростью, равной половине скорости, приобретенной в конце падения.

Следовательно, расстояние, пройденное свободно падающим телом, можно найти, умножив половину скорости, достигнутой им в конце падения, на прошедшее число промежутков времени. Но скорость в конце падения пропорциональна числу прошедших промежутков времени. Поэтому пройденное расстояние должно быть пропорционально квадрату времени падения.

Умножив половину конечной скорости на время падения, Галилей получил площадь треугольника, которая была геометрическим выражением расстояния, пройденного свободно падающим телом. Пользуясь им, Галилей нашел и расстояния, проходимые свободно падающим телом в течение каждого из последующих промежутков времени (численно равные площадям AA_1MH, HH_1KH, NN_1RB).

Переводя полученные Галилеем результаты на математический язык современной механики, найдем, что скорость свободно падающего тела V в конце промежутка времени t равна gt, где g — ускорение свободного падения. Пройденное расстояние S равно $S = \frac{gt^2}{2}$. В течение каждого из последующих промежутков времени оно будет пропорционально нечетным числам натурального ряда.

В тесной связи с исследованием законов свободного падения стоит изучение Галилеем колебаний маятника. Замеченная им еще в юности изохронность колебаний (при небольших дугах размаха) позволила применить маятник для измерения времени.

Один из опытов Галилея с маятником привел его к замечательному открытию: падающее с некоторой высоты тело, по какому бы пути оно ни следовало, приобретает в конце его одинаковую скорость. Результат этого опыта, описание которого мы приводим ниже, Галилей сформулировал в следующих словах: «Степени (величины.— *Б.* и *М.*) скорости, приобретаемые одним и тем же телом при движении по наклонным плоскостям, равны между собой, если высоты этих наклонных плоскостей одинаковы».

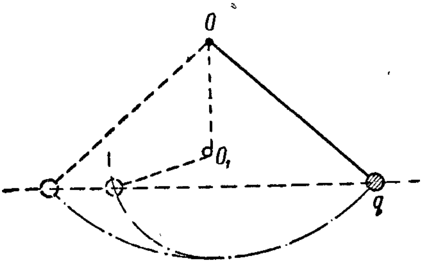

Рис. 23. Опыт Галилея с маятником.

Подвесив в точке O (рис. 23) небольшой груз q на тонкой нити, Галилей отводил его в сторону и отпускал. Опускаясь по дуге круга, груз приобретал в самой нижней ее точке определенную скорость, которая позволяла ему подняться по дуге круга до прежней высоты. Забив гвоздь O_1 ниже точки подвеса, Галилей поднимал груз на ту же высоту. При колебании маятника нить огибала гвоздь. Несмотря на это, достигнув самой нижней точки, маятник продолжал подниматься и достигал прежней высоты.

Из этого опыта следовало, что скатывающийся по наклонной плоскости шар приобретает в конце ее ту же скорость, как и при падении с высоты наклонной плоскости на основание. Его скорость зависит не от длины наклонной плоскости, а только от ее высоты. Отсюда было легко сделать заключение, что ускорение скатывающегося по наклонной плоскости шара во столько раз меньше ускорения свободного падения, во сколько раз высота наклонной плоскости меньше ее длины. Следовательно, сила, движущая шар по наклонной плоскости, во столько же раз меньше силы, приводящей его в состояние свободного падения.

Сделав эти выводы, Галилей мог не только проверить найденные им соотношения, но и найти величину ускорения свободного падения.

Проверку законов свободного падения Галилей произвел на наклонной плоскости длиной 12 локтей (1 локоть = 46,72 *см*), один конец которой был поднят на 1—2 локтя. В доске, служившей наклонной плоскостью, был сделан желоб, выстланный пергаментом для уменьшения трения. По желобу скатывались бронзовые шарики, движение которых было достаточно медленным и можно было точно регистрировать моменты прохождения шариками определенных расстояний.

Измерение времени производилось с помощью водяных часов (по количеству воды, вытекавшей тонкой струей из большого сосуда в маленький). Опыты показали, что скатывание шарика на $^1/_4$ длины желоба занимало вдвое меньше времени, чем на всю его длину, т. е. пройденное расстояние пропорционально квадрату времени, как это и следовало из найденного теоретически закона. При изменении наклона желоба результат оставался тем же.

Зная закон равновесия тел на наклонной плоскости, Галилей путем логических рассуждений пришел к выводу, что «импульс», получаемый телом в свободном падении, относится к импульсу, действующему вдоль наклонной плоскости, как длина наклонной плоскости к ее высоте». Но ускорение свободного падения пропорционально вызывающему падение «импульсу». Поэтому ускорение свободного падения находится в таком же отношении к ускорению скольжения по наклонной плоскости, как вызывающие их «импульсы» (силы).

В действительности Галилей наблюдал не скольжение, а скатывание шарика по наклонной плоскости. На вращение шарика при этом затрачивалась часть его потенциальной энергии. Поэтому ускорение свободного падения не могло быть определено точно на основании этого опыта.

Примечание. Шар с массой m, находящийся на вершине наклонной плоскости, обладает потенциальной энергией Ph, где $P = mg$, а h — высота наклонной плоскости. При скатывании шара потенциальная энергия переходит в кинетическую $mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}$, где I — момент инерции шара, равный $\frac{2}{5}mr^2$; ω — угловая скорость вращения шара; v — скорость движения шара внизу наклонной плоскости. Так как $\omega = \frac{v}{r}$, то $mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} mr^2 \cdot \frac{v^2}{r^2} = \frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{5}$. Сокращая, находим $gh = \frac{7}{10}v^2$, откуда

$$g = 0{,}7\frac{v^2}{h}.$$

Еще до Галилея некоторые исследователи предполагали независимость одного от другого совершаемых телом движений. К числу их, как мы видели, принадлежал Тарталья. Но только Галилей ввел в механику это понятие в качестве общего принципа. Говоря о вечности движения тела по инерции на горизонтальной плоскости, он писал: «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 силою тяжести, благодаря чему возникает сложное движение, слагающееся из равномерного горизонтального и естественного ускоренного движения».

В этих словах не только изложен принцип сложения двух движений, но и впервые в истории механики сказано, что ускорение свободного падения сообщается телу силой тяжести.

Из теоретических положений Галилея следовало, что выброшенный горизонтально снаряд должен был бы по инерции двигаться равномерно (без учета сопротивления воздуха). Но с момента выхода из ствола он начинает падать и, падая, в каждую последующую секунду проходит расстояния, пропорциональные натуральному ряду нечетных чисел. По истечении первой секунды снаряд пролетит горизонтально, скажем, 1000 *м* и одновременно снизится на расстояние, проходимое падающим телом в первую секунду. Во вторую секунду он пролетит по горизонтальному направлению прежнее расстояние, снизившись втрое больше, чем в первую секунду, и т. д.

Так как горизонтальное движение снаряда и его свободное падение непрерывны, то траектория имеет вид кривой линии: при горизонтальном направлении выстрела — вид полупараболы, обращенной вершиной вверх, при направлении под углом 45° к горизонту — вид параболы.

Построение траектории снаряда показывало, что снаряд, выброшенный пушкой в горизонтальном направлении, должен упасть на землю одновременно со снарядом, свободно падающим с высоты пушечного ствола. Это утверждение казалось современникам Галилея настолько странным, что в «Диалоге о двух главнейших системах мира» он уделяет ему большое внимание.

«Кажется удивительным, что в то короткое время, которое требуется для отвесного падения до земли с высоты, скажем, ста локтей, ядро, гонимое огнем, сможет пролететь иногда четыреста, иногда тысячу, иногда четыре тысячи и даже сто тысяч локтей, так что при всех выстрелах, сделанных параллельно горизонту, ядро держится в воздухе равные между собой промежутки времени».

На это Галилей отвечает: «Если бы не имелось приходящего сопротивления воздуха, я считал бы бесспорным, что если одним ядром выстрелить из пушки, а другому дать упасть с той же высоты отвесно вниз, то оба они достигнут Земли в одно и то же мгновение, хотя первое пройдет расстояние, быть может, в десять тысяч локтей, а второе — только в сто; при этом предполагается, что поверхность Земли совершенно ровная».

Галилей, как техник и экспериментатор, понимал, что сопротивление воздуха и другие факторы должны отражаться на теоретически выведенных элементах (скорости, пройденном расстоянии) движения тел. Он указывал, например, что свободное падение не может быть строго равноускоренным, а траектория брошенного тела по своему виду несколько отличается от параболы.

Введя в механику понятия о неравномерных движениях, средней скорости и ускорении, а также принцип инерции движения и пользуясь математическим методом изучения движений, Галилей, а позднее Ньютон, заложили основы динамики материальной точки.

13. МЕХАНИКА ДЕКАРТА

Особое место в истории науки о природе занимают исследования современника Галилея — философа-математематика *Рене Декарта* (1596—1650).

В основе натурфилософии Декарта лежало представление о материи и свойственном ей движении. В природе нет никаких сил, а только механическое движение, которое непосредственно передается от одних тел другим давлением или толчком.

Тела воздействуют одно на другое, сталкиваясь друг с другом. Без этого никакое тело не может изменить своего состояния, и если частица материи «начала двигаться, то будет продолжать это движение постоянно с равной силой до тех пор, пока другие ее не остановят или не замедлят ее движения», и далее: «...каждая из частиц по отдельности всегда стремится продолжать его (движение.— *Б.* и *М.*) по прямой линии» [1]. Так сформулировал Декарт принцип инерции, принятый в механике Ньютона.

Однако Декарт в переписке с французским физиком-экспериментатором Мерсенном (1588—1648) высказал положение, что «камень не может проявлять совершенно одинаковой наклонности к восприятию нового движения или увеличению своей скорости и в том случае, когда он уже движется с большой скоростью или когда он движется медленно» [2], т. е. инерция очень быстро движущегося тела может быть иной, чем тела покоящегося. Но инерция тела пропорциональна его массе. Следовательно, масса тела может изменяться в зависимости от его скорости. Впоследствии оказалось справедливым, что при очень большой скорости движения происходит заметное изменение массы, но замечание Декарта не было принято в классической механике, принимающей величину массы независимой от скорости движения тела.

Понимая под «силой» меру движения, равную произведению массы тела на его скорость, Декарт писал: «Если одно тело сталкивается с другим, оно не может сообщить ему никакого другого движения, кроме того,

---

[1] Р. Декарт, Избранные произведения, Госполитиздат, 1950, стр. 198, 202.

[2] Ф. Розенбергер, История физики, т. II, ОНТИ, 1935, стр. 129.

которое потеряет во время этого столкновения, как не может и отнять у него больше, чем одновременно приобрести и себе»[1].

По Декарту, движение тела есть переход его из соседства соприкасающихся с ним тел в соседство других. Если тело *A* удаляется от тела *B*, то с тем же правом можно сказать, что и тело *B* удаляется от тела *A*. Это положение есть не что иное, как принцип относительности движений, который был известен еще древним философам, а в средние века провозглашен *Николаем Кребсом* (Кузанским, 1401—1464) и окончательно установлен Галилеем.

Решая проблему соударения тел, Декарт исходил из философского постулата неуничтожаемости движения. При этом, однако, он допустил ошибку, не учитывая, что скорость — величина векторная и что, суммируя количество движения соударяющихся тел, необходимо принимать во внимание направления скоростей.

Дедуктивная механика Декарта представляла собой философскую систему.

В отличие от Галилея, который занимался экспериментальным исследованием законов движения, Декарт даже заявлял, что если его выводы и не подтвердились бы на опыте, то он все-таки больше поверил бы своему разуму, чем чувствам. Декарт стремился к философскому раскрытию природы вещей. В письме к физику Мерсенну он дал резкий отзыв о работах великого флорентинца: «Галилей, не стараясь проникнуть в первые причины природы, искал лишь объяснения некоторых действий и строил таким образом без фундамента. Все сказанное им относительно скорости тел, падающих в пустом пространстве, лишено основания. Ему следовало бы прежде всего определить природу тяжести; и если бы он узнал, что она такое в действительности, то ему было бы известно и ее отсутствие в пустоте[2].

Однако физики, даже разделявшие общие мировоззренческие концепции Декарта, не могли следовать его методу. Так, например, Гюйгенс говорил, что «Декарт, по-видимому, собирается решать все вопросы физики,

---

[1] Р. Декарт, Избранные произведения, Госполитиздат, 1950, стр. 200.

[2] Ф. Розенбергер, История физики, т. II, ОНТИ, 1935, стр. 128—129.

не заботясь о том, рассуждает ли он правильно или нет»[1].

Метод Декарта не мог способствовать развитию физики, перед которой в XVII в. стояли конкретные механические и оптические проблемы. Но с исторической точки зрения теория Декарта имела большое значение. Так, например, концепция Декарта о неуничтожаемости движения заключала в неявной форме принцип сохранения механической энергии.

14. РАЗВИТИЕ ИДЕЙ МЕХАНИКИ ГАЛИЛЕЯ

Развитие механики после Галилея ознаменовалось торжеством экспериментального направления. К эксперименту призывали как последователи Галилея, так и его противники.

Интересно отметить, что экспериментировать стали даже некоторые из ученых иезуитов — злейших врагов новой науки, конечно, с целью ее опровержения. Например, Ричиоли (1598—1671) вместе со своим учеником физиком-иезуитом Гримальди (1618—1663), чтобы опровергнуть законы свободного падения, открытые Галилеем, наблюдали свободное падение тел с высоты башни. Для измерения времени они пользовались небольшим маятником, совершавшим шесть полных колебаний в секунду. Им пришлось убедиться, что расстояние, пройденное свободно падающим телом, действительно пропорционально квадрату времени.

Огромное значение для развития механики в XVII в. имели исследования английских физиков, образовавших в 1645 г. «ученый кружок» в Лондоне. Этот кружок, сначала собиравшийся в частном доме, с 1660 г. (с разрешения английского короля) получил официальное признание. Позднее ему было присвоено название Лондонского Королевского общества.

Заседания общества посвящались демонстрациям физических экспериментов, производившихся физиками (Бойлем, Гуком и др.). Наибольшее внимание членов

---

[1] Из письма Гюйгенса Лейбницу от 11 июля 1692 г. (Цитируется по книге: Ф. Даннеман, История естествознания, т. II, ОНТИ, 1936, стр. 149.)

общества привлекала астрономия, имевшая практическое значение для мореплавания. Лондонское Королевское общество сыграло важную роль в создании Гринвичской астрономической обсерватории.

Из частного ученого общества организовалась и Парижская академия наук.

В переписке с Кеплером Галилей высказывал опасение, что не найдется продолжателя его механических исследований. Но его сомнения были напрасны. Одним из первых последователей Галилея был *Эванджелиста Торричелли.*

Сын знатных и состоятельных родителей, Торричелли в возрасте 20 лет, получив дома некоторую математическую подготовку, отправился в Рим, чтобы закончить свое образование под руководством математика *Бенедитто Кастелли* (1577—1644).

В 1638 г. вышел в свет труд Галилея «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местным движениям». Познакомившись с ним, Торричелли принялся за самостоятельную работу — «Трактат о движении тяжелых тел», вышедшую во Флоренции в 1641 г., а в 1644 г. изданную на латинском языке под заглавием «О движении тяжелых тел, свободно падающих или брошенных».

В этом труде он пытался дать новые, собственные выводы открытых Галилеем законов динамики, защищал их от нападок аристотелианцев и исследовал траекторию брошенного тела.

Любимый ученик Галилея Винченцо Вивиани, математик и инженер герцога Тосканского, совместно с Торричелли, Кастелли и другими молодыми учеными организовал во Флоренции «академию опыта» (Accademia del Cimento). Члены этой академии ставили своей целью осуществление физических опытов, в числе которых многие были направлены на проверку положений, высказанных, но не проверенных на опыте Галилеем.

Например, Галилей предполагал, что воздух оказывает значительное сопротивление телу, движущемуся с большой скоростью. Он считал возможным проверить это предположение, сравнив движения пули при выстрелах вниз с высоты 100 локтей и с небольшой высоты.

Хотя при выстреле с большой высоты тяжесть пули должна увеличивать скорость ее движения, но, по мнению Галилея, в этом случае скорость пули может быть сильно уменьшена сопротивлением воздуха.

Предположение Галилея было проверено членами академии. Чтобы судить о сравнительной скорости пуль, выстрелы были произведены в железную доску. Считалось, что та из пуль имела большую скорость, какая больше изменила свою форму.

Прямым продолжателем исследований Галилея в области динамики был голландский ученый *Христиан Гюйгенс* (1629—1695). Сын богатого землевладельца, Гюйгенс получил юридическое образование в Лейденском университете, одновременно не оставляя самостоятельных занятий математикой и механикой, которые изучал еще до поступления в университет под руководством отца. Начало научной деятельности Гюйгенса было связано с рядом математических работ. Первый трактат о квадратуре гиперболы и эллипса он написал в возрасте 22 лет. В эти же годы Гюйгенс работал над усовершенствованием зрительной трубы и изобретением точных часов, пригодных для астрономических наблюдений.

В возрасте 34 лет Гюйгенс был избран членом Лондонского Королевского общества, а через три года — и Парижской академии наук, после чего жил в Париже, где ему была отведена квартира в Королевской библиотеке. Но в 1681 г., в связи с преследованием во Франции протестантов, он возвратился в Гаагу, в которой и провел всю остальную часть жизни.

Гюйгенс был знаменитым физиком, математиком и астрономом. Мы коснемся лишь его работ, имеющих отношение к развитию механики. Механические исследования Гюйгенса тесно связаны с его работой над усовершенствованием часов.

Точное измерение времени оставалось нерешенной проблемой в первой половине XVII в. Галилей применял еще водяные часы. Правда, у него была мысль использовать маятник в качестве регулятора хода часов, но слепота помешала ее осуществлению. Перед смертью Галилей поручил своему сыну Винченцо закончить конструирование часов с маятником, но и тот не смог разрешить поставленную перед ним задачу.

Со второй половины XIV в. применялись колесные, главным образом башенные часы, ход которых регулировался с помощью особого устройства — «билянца» (рис. 24). «Билянцем» называлась нагруженная гирями горизонтальная штанга, вращающаяся около вертикальной оси.

Особое храповое колесо часового механизма зацепляло то верхнюю, то нижнюю лопатку на вертикальной оси «билянца». Зацепив верхнюю лопатку, храповик двигал ее в сторону своего вращения, но через короткое время другой зубец упирался в нижнюю лопатку «би-

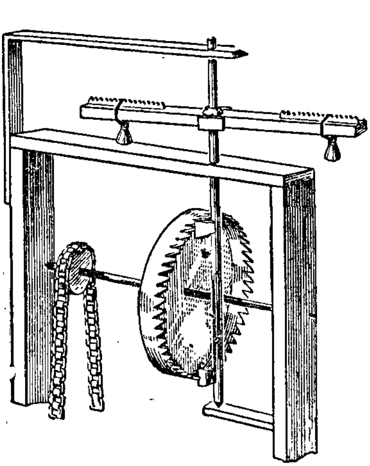

Рис. 24. Регулятор старинных часов — «билянц».

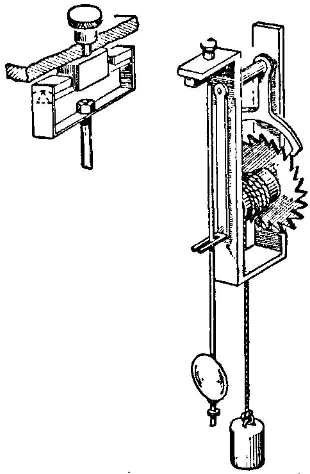

Рис. 25. Регулятор часов, созданный Гюйгенсом.

лянца» и двигал его в обратную сторону. Таким образом, при каждом повороте оси «билянца» храповое колесо подвигалось на один зубец.

Такие часы, применявшиеся даже в астрономических обсерваториях, не отличались точностью хода. Они были установлены, например, в 1348 г. на башне в Дувре, где показывали время до 1872 г.

Гюйгенс заменил «билянц» колесных часов маятником (рис. 25), который при своем колебании зацепляет то один, то другой зубец храпового колеса и таким образом регулирует ход часов. При каждом качании маятника храповое колесо поворачивается на один зубец. Одновременно толчки зубцов храпового колеса поддерживают колебания маятника, не давая им затухать.

Гюйгенс решил задачу: по какому пути должен двигаться простой (математический) маятник, чтобы период колебаний его совершенно не зависел от амплитуды размаха. Этот путь оказался циклоидой — кривой, описываемой какой-либо точкой обода колеса, катящегося по прямой линии. Из какой бы точки циклоиды не начал падение двигающийся по ней маятник, он пришел бы через один и тот же промежуток времени в самое нижнее положение, причем движение маятника по любому другому пути, не исключая и прямолинейного, было бы более продолжительным. Изохронность колебаний маятника, двигающегося по дуге окружности, на которую указывал Галилей, справедлива лишь постольку, поскольку небольшая дуга окружности близка к циклоиде.

Этот теоретический вывод Гюйгенс применил при конструировании часов. Он создал маятник, гибкая нить которого при колебаниях прижималась попеременно к двум пластинкам, имевшим вид циклоид. Огибая пластинки, нить заставляла груз двигаться не по дуге круга, а по циклоиде. Такая конструкция, однако, по техническим трудностям ее выполнения, не получила распространения.

Изобретение часов послужило стимулом к исследованию Гюйгенсом законов колебаний маятника, которое было начато, но не доведено до конца Галилеем Продолжая изучение механических проблем, начатое Галилеем, Гюйгенс следовал и его методу. Он находил путем геометрических соображений законы механики и проверял их на опыте.

Движение маятника по дуге круга Гюйгенс свел к движению тела, скатывающегося по ряду переходящих одна в другую наклонных плоскостей. Задача исследования колебаний маятника сводилась им, таким образом, к изучению движения по наклонной плоскости. Гюйгенс доказал теорему: «Если тело падает с определенной высоты непрерывным движением по любому числу связанных плоскостей любого наклона, то его конечная скорость будет всегда одна и та же, пока не меняется высота, и будет равна скорости, приобретаемой при свободном вертикальном падении с этой высоты» [1].

Гюйгенс показал справедливость и обратного поло-

---

[1] Х. Гюйгенс, Три мемуара по механике, изд. АН СССР, 1951.

жения: если тело после падения вновь поднимается вверх, то оно всегда поднимется на ту же высоту, с которой упало, независимо от числа и наклона связанных плоскостей, по которым оно будет двигаться.

Гюйгенс продолжил эти исследования, применяя их выводы к движению тела, падающего по циклоиде, обращенной вершиной вниз.

Положим, что тело падает из какой-либо точки циклоиды (рис. 26), доходит до наиболее низкого положения в точке n и, продолжая движение по инерции, поднимается до той же высоты. Как доказал Гюйгенс, время этого движения тела по циклоиде относится ко времени свободного падения его вдоль оси $n'n$, как длина окружности к своему диаметру, т. е. это отношение равно постоянной величине π.

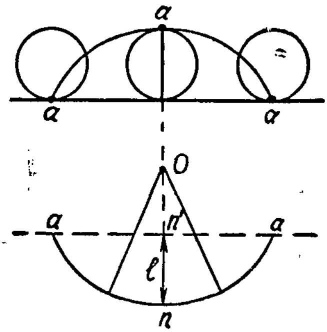

Рис. 26. К выводу формулы периода колебания циклоидального маятника.

Обозначив период простого колебания по циклоиде через T, а время падения вдоль оси циклоиды через t, длину оси $n'n$ через b, находим

$$T:t=\pi \quad \text{и} \quad b=\frac{gt^2}{2}, \text{откуда } t=\sqrt{\frac{2b}{g}} \quad \text{и} \quad T=\pi t=\pi\sqrt{\frac{2b}{g}}.$$

Из формулы следует, что период колебания циклоидального маятника не зависит от высоты, с которой началось падение. Так была решена занимавшая механиков того времени задача о «таутохроне» — кривой, падение вдоль которой из любой ее точки до самой нижней ее точки происходит в течение одного и того же промежутка времени.

Из выведенной Гюйгенсом формулы для периода колебания циклоидального маятника можно получить с некоторой точностью период колебания обыкновенного маятника, движущегося по окружности, и тем точнее, чем ближе дуга окружности к циклоиде.

Опишем из точки O (рис. 26) радиусом $On=2l$ дугу окружности, которая будет соприкасаться с циклоидой, очень мало отличаясь от дуги этой кривой. Подвешенный в точке O маятник длиной $l = 2b$ при колебаниях небольшого размаха будет двигаться по дуге циклоиды. Поэтому период простого его колебания T, равный времени движения по дуге циклоиды, определится по формуле

$$T = \pi \sqrt{\frac{2b}{g}} = \pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

а период полного колебания равен $2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$.

Эта формула, справедливая при малых размахах кругового маятника, дает возможность, измерив период его колебания, определить ускорение свободного падения.

Благодаря теоретическим исследованиям Гюйгенса, маятник получил широкое применение для измерения силы тяжести.

Первые наблюдатели пользовались для этой цели подвешенным на тонкой нити свинцовым или медным шариком диаметром около 2 *см*, принимая его за математический маятник. Изменением длины нити стремились добиться того, чтобы этот маятник совершал колебания точно с тем же периодом, как и секундный маятник часов, выверенных путем астрономических наблюдений. Таким нитяным маятником пользовался даже *Ф. Бессель* (1784—1846) при определении силы тяжести в 1825—1826 гг.

Однако точное измерение длины нитяного маятника и пользование им представляют некоторые трудности. Поэтому с начала XIX в. стали применять так называемый оборотный (поворотный) физический маятник, предложенный в 1792 г. французским инженером *Ж. Прони* (1755—1839). У оборотного маятника легко определить приведенную длину, т. е. длину математического маятника, совершающего изохронные колебания.

Проблема отыскания приведенной длины маятника была поставлена по существу еще около середины XVII в. Она сводилась к отысканию в маятнике центра качания, т. е. точки, совершающей колебания с периодом, равным периоду колебаний данного маятника при условии, что в ней сосредоточена вся его масса.

Вот что писал об этом Гюйгенс: «Когда я был еще почти мальчиком, ученнейший муж Мерсенн задал мне и многим другим задачу — определить центр качания. Из писем, которые Мерсенн писал мне, а также из недавно опубликованных мемуаров Декарта, заключающих ответ на письма Мерсенна по этому поводу, я заключаю, что эта задача пользовалась в то время известной славой среди математиков. Мерсенн поставил мне задачу нахождения центров качания круговых секторов, подвешенных или в центре, или в середине дуги и могущих совершать боковые качания, а также круговых сегментов и равнобедренных прямоугольников, подвешенных или в вершине, или в середине основания. Задача сводилась к построению простого маятника, то есть нити с подвешенным грузом такой длины, чтобы он совершал свои колебания как раз в то время, как указанные фигуры... Я в то время ничего не нашел, что позволило бы мне приступить к расчетам, и как бы повернул назад у самого порога и воздержался от всякого исследования. Но и те, кто надеялись, что решили задачу, знаменитые люди, как Декарт, Оноре Фабри и другие, вовсе не достигли цели или достигли ее только в немногих, особенно простых случаях».

Регулируя ход часов, у которых маятник снабжен, кроме нижнего груза, еще небольшим передвижным грузиком, Гюйгенс исследовал вопрос о положении центра качания колеблющихся тел.

Гюйгенс исходил из представления, что физический маятник есть система связанных между собой материальных точек, которые находятся на различных расстояниях от оси подвеса и, будучи свободными, имеют различные периоды колебаний. В основу своего исследования он положил постулат: «Если любое число весомых тел приходит в движение благодаря их тяжести, то общий центр тяжести этих тел не может подняться выше, чем он был в начале движения».

Справедливость этого постулата Гюйгенс обосновывал тем, что тело под действием силы тяжести может лишь опускаться. Если несколько тел соединены в систему, то центр ее тяжести под влиянием тяготения к Земле может тоже только понижаться. У системы, выведенной из положения равновесия посторонней силой и совершающей колебательное движение, центр тяжести не может подняться выше уровня, до которого он был поднят. Отрицание этого постулата привело бы к доказательству возможности «вечного движения».

Исходя из приведенного положения, Гюйгенс нашел правило определения центра качания колеблющейся системы материальных точек: «Дан маятник, состоящий из произвольного числа частей; множат вес каждой части на квадрат ее расстояния от оси колебаний. Если сумму этих произведений разделить на произведение, получающееся от умножения общего веса всех частей на расстояние общего центра тяжести от той же оси колебаний, то получается длина простого маятника, или расстояние между осью колебаний и центром качаний сложного маятника».

Рассматривая маятник как систему материальных точек, его центр качаний можно найти так: возьмем сумму произведений масс точек на квадраты их расстояний от оси подвеса (т. е. момент инерции маятника относительно этой оси); затем возьмем сумму произведений масс точек на расстояния их от оси подвеса (т. е. статический момент относительно той же оси); первую сумму разделим на вторую. Частное представляет собой расстояние центра качаний от оси подвеса.

Далее Гюйгенс доказал теорему: «Если один и тот же маятник подвешивается один раз на более коротком, другой раз на более длинном подвесе, то расстояния центра качаний от центра тяжести обратно пропорциональны расстояниям от центра тяжести до оси колебаний».

Следовательно, центр качаний и точку подвеса (ось колебаний) можно поменять местами.

Этот вывод и послужил основой для устройства оборотного (поворотного) маятника, предложенного Прони и конструктивно осуществленного английским физиком *Г. Кэтером* (1777—1835).

Оборотный маятник имеет две передвижные призмы, ребра которых служат осью колебаний. Призмы расположены так, что центр тяжести находится между ними. Если ребро нижней призмы совмещено с центром качаний, то расстояние между ребрами призм равно приведенной длине данного маятника. Чтобы осуществить это совмещение, экспериментально находят положение призм, при котором период колебаний остается одним и тем же, какая бы из призм не служила осью колебаний. Определив приведенную длину маятника и установив на опыте продолжительность периода его колебаний, можно вычислить величину ускорения свободного падения.

Занимаясь изучением колебаний маятника, Гюйгенс обратил внимание на натяжение нити маятника. Это привело его к исследованию явлений, которые возникают при движении тел по окружности. Выводы, относящиеся к этому вопросу, были изложены им в мемуаре, опубликованном уже после его смерти (1703).

В начале мемуара Гюйгенс подробно разбирал опыт с вращением свинцового шарика на нити и устанавливал причину натяжения нити. Эту причину он видел в «центробежной силе», которая действует на шарик.

В современной механике, как известно, центробежной силой называют инерциальную силу, действующую на связи. Такая сила при вращении тела приложена, например, в опыте Гюйгенса к нити. Грузик натягивает нить потому, что вследствие инерции он должен был бы двигаться прямолинейно. Но на него действует центростремительная сила натяжения, возникающего в нити. Центробежная же 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 это представляли механики XVII в.

Далее Гюйгенс доказал несколько теорем, из которых легко вывести следующие положения:

1. Если равные тела движутся по окружностям различного радиуса с одинаковой (линейной) скоростью, то отношение возникающих центробежных сил обратно пропорционально диаметрам окружностей, так что на окружности меньшего радиуса указанная сила больше.

2. Если равные тела движутся по окружностям одного и того же радиуса с различными скоростями, то центробежные силы их относятся между собой, как квадраты скоростей.

Для доказательства этих теорем Гюйгенс, считая, что центробежная сила приложена к вращающемуся телу, определял действие центробежной силы отклонением тела от касательной к круговому пути (рис. 27). Длина прямолинейного пути AD, который прошло бы тело по инерции в течение небольшого промежутка времени, равна произведению линейной скорости v на промежуток времени t. Отклонение тела к центру, которое может быть принято равным $DB = AC$, происходит под действием центростремительной силы и потому представляет собой равноускоренное движение. Путь d, проходимый телом по направлению к центру, равен $\frac{1}{2}at^2$, где a — ускорение. Из чертежа находим $CB^2 = AD^2 = (2R - d)d = 2Rd - d^2$ или, пренебрегая квадратом весьма малой величины d, $AD^2 = 2Rd$. Так как $AD = vt$, то $v^2t^2 = 2Rd$. Заменяя d через $\frac{1}{2}at^2$, находим $v^2t^2 = 2R\frac{1}{2}at^2$.

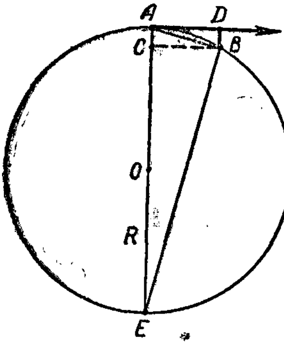

Рис. 27. К выводу формулы центростремительного ускорения.

Отсюда центростремительное ускорение a равно

$$a = \frac{v^2}{R}.$$

Открытие Гюйгенса имело огромное значение для естественнонаучного мировоззрения того времени: круговое движение планет, признанное не только Аристотелем, но и Галилеем за «естественное», переходило в категорию «насильственного», т. е. происходящего под действием сил.

Исследование Гюйгенсом центробежной силы вносило бóльшую ясность в понятие о силах вообще.

Гюйгенс сравнивал «центробежную» силу с тяготением, указывая на пропорциональность этих сил массе тела.

«...Центробежные силы разных тел,— писал он,— движущихся по одинаковым кругам с одинаковой скоростью, относятся друг к другу, как веса тел или как количества материи. Как все весомые тела стремятся падать вниз с одинаковой скоростью и одинаковым ускоренным движением, и притом это стремление обладает тем большей силой, чем они больше, так должно быть и с теми телами, которые стремятся удалиться от центра, так как их стремление, как мы показали, совершенно подобно тому, которое происходит от тяготения».

Другая его теорема доказывает прямую пропорциональность центробежной силы квадрату скорости и обратную пропорциональность радиусу кругового пути. Следствием этой теоремы можно считать утверждение, что сила пропорциональна ускорению.

Таким образом, второй закон динамики содержался в неявной форме в теоремах Гюйгенса о центробежной силе, хотя и не был сформулирован им.

Исследуя экспериментально движение тела по окружности, Гюйгенс сделал очень интересный опыт, возбудивший внимание его современников. Опыт Гюйгенса заключался в следующем: в трубки, расположенные под углом к оси вращения, помещают деревянные шары; при вращении трубок шары откатываются к их верхним, удаленным концам; если же трубки наполнить водой, то шары передвинутся к оси вращения.

Это явление объясняется тем, что частицы воды не удерживаются молекулярным сцеплением на круговых траекториях и отлетают по касательным в верхние концы труб. Вода — более плотное тело, поэтому она вытесняет деревянные шары к центру вращающейся системы. Аналогично этому объясняется и действие сепаратора, отделяющего сливки от молока. Молоко наливается в цилиндрический сосуд, приводимый в быстрое вращение. Более легкие масляные частицы собираются возле оси вращения цилиндра и вытекают через отверстие наружу. Молоко, от которого отделены сливки, удаляется из сепаратора.

Начатое Гюйгенсом и законченное Ньютоном изучение законов движения тел по окружности имело большое значение для развития техники более позднего периода, когда скорость вращающихся частей машин (например, маховиков паровых машин) достигла огромных величин.

Один из замечательнейших механизмов, основанных на действии возникающих при вращении сил,— центробежный регулятор, применяемый для впуска пара в цилиндры паровых машин. Центробежный регулятор (рис. 28) имеет тяжелые шары, подвешенные к двум стержням, вращающимся при работе паровой машины. Вследствие вращения шары отходят в стороны от оси и тем больше, чем больше скорость вращения.

Если ход паровой машины слишком быстр, расходящиеся шары через тяги уменьшают впуск пара. При нежелательном замедлении они, наоборот, увеличивают впуск пара и ускоряют ход машины.

Сила тяжести P шара регулятора направлена вертикально вниз. Она может быть разложена на две силы, из которых одна f_2 растягивает стержень, а другая f_1 направлена горизонтально к оси вращения и заставляет шар двигаться по окружности. Сила f_1 должна быть равна $f = \frac{mv^2}{R}$, где m — масса шара, R — радиус описываемой им окружности, v — линейная скорость. Или, заменяя линейную скорость v через ωR, где ω — угловая

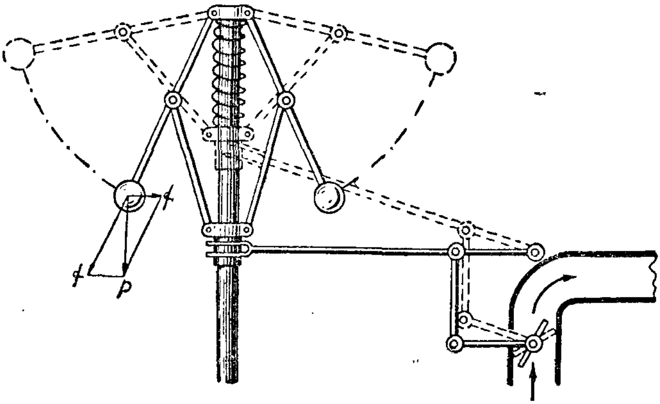

Рис. 28. Центробежный регулятор.

скорость, получим для определения f формулу $f = m\omega^2 R$. Сила f рассчитывается так, чтобы определенной ее величине соответствовало нужное положение устройства, регулирующего впуск пара.

15. ПРОБЛЕМА УДАРА

Весьма плодотворными были исследования Гюйгенса проблемы удара, имеющей немаловажное значение в технике. Она заключалась в определении направления движения и величины скорости, с которой должны двигаться два столкнувшихся друг с другом тела.

Различие масс, скоростей и направления движения тел, а также их упругость делали решение этой задачи в общем виде очень сложным. Лондонское Королевское общество в 1668 г. даже объявило конкурс, в котором приняли участие несколько физиков и математиков — Д. Валлис, X. Врен и X. Гюйгенс.

Для простейшего случая, когда соударяющиеся тела совершенно неупруги, точное решение было дано английским математиком *Джоном Валлисом* (1616—1703) в том же году. Валлис показал, что если два неупругих тела движутся по одной прямой, то общая скорость их движения после удара будет равна отношению алгебраической суммы количеств движения обоих тел к их общей массе, т. е. скорость движения выразится через первоначальные скорости v_1 и v_2 соударяющихся тел и их массы m_1 и m_2 так: $V=\frac{m_1v_1 \pm m_2v_2}{m_1+m_2}$, где знаки плюс или минус соответствуют случаю совпадения или противоположности направления движений.

Решение проблемы для случая неупругих тел облегчалось очевидностью механических последствий соударения, вытекавшей из обыденного опыта, хотя Валлис и не мог объяснить кажущегося уничтожения противоположно направленных движений.

Значительно большие трудности представлял случай упругих тел. Эта проблема была решена Гюйгенсом *в предположении, что тела абсолютно упруги*. «Не входя в рассмотрение причины отскакивания твердых тел после соударения,— писал Гюйгенс,— принимаем следующее положение: если два одинаковых тела, движущиеся с одинаковой скоростью навстречу друг другу, сталкиваются прямым ударом, то каждое из них отскакивает назад с той же скоростью, с какой ударилось».

Для вывода законов движения соударяющихся тел Гюйгенс прибегал к воображаемому опыту, в основе которого лежал принцип относительности: «Движение тел, *а также их одинаковые или разные скорости* надо рассматривать, как *относительные по отношению к другим* телам, которые мы считаем покоящимися, не учитывая того, что как те, так и другие тела могут участвовать в другом общем движении. Поэтому два тела, соударяясь, даже в случае, если оба вместе участвуют еще в другом равномерном движении, для лица, также участвующего в общем движении, действуют друг на друга так, как будто бы этого общего движения не существовало».

Гюйгенс поясняет этот принцип примером пассажира, производящего опыты по соударению тел на равномерно движущемся корабле. Для наблюдателя на корабле эти опыты протекают с теми же результатами, какие получает наблюдатель, производящий их на берегу.

Представим себе, что на лодке, плавно идущей вдоль набережной (рис. 29), сталкиваются два упругих шара, которые движутся с одинаковой скоростью навстречу друг другу. При этом скорости движения шаров (относительно лодки) и самой лодки одинаковы. Шары движутся по линии, соединяющей корму с носом лодки.

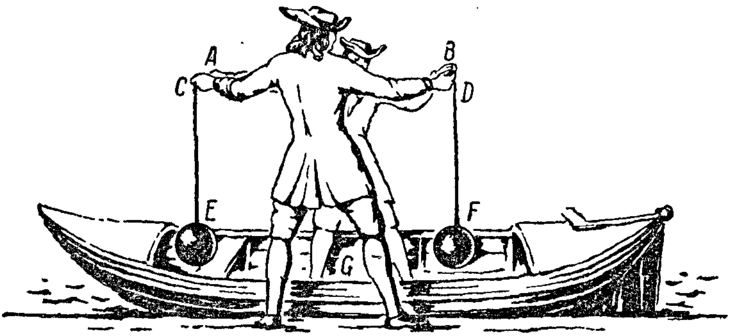

Рис. 29. Движение сталкивающихся шаров (по Гюйгенсу).

Наблюдатель в лодке видит, что шары сближаются с одинаковой скоростью, а после удара откатываются в противоположных направлениях.

Для наблюдателя на набережной один из сближающихся шаров, движение которого противоположно по направлению движению лодки, будет казаться неподвижным, а другой шар — движущимся к нему с удвоенной скоростью.

После удара, наоборот, второй шар покажется остановившимся, а первый — катящимся с удвоенной скоростью.

Из этого воображаемого опыта Гюйгенс сделал вывод: «Если с покоящимся телом соударяется одинаковое с ним тело, то ударившееся тело приходит в состояние покоя, а покоящееся тело приходит в движение со скоростью ударившегося о него».

Это явление объясняется следующим образом.

Когда движущийся шар ударяется о такой же покоящийся, то центры их сближаются. В этот момент, как и и при ударе неупругих тел, оба шара должны бы получить скорость, равную половине скорости 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.

Следующее доказываемое Гюйгенсом положение заключается в том, что «если два одинаковых тела соударяются с разными скоростями, то они при ударе обмениваются скоростями».

Переходя далее к рассмотрению соударения неодинаковых тел, т. е. тел различной массы, Гюйгенс предпосылает ему гипотезу, доказывающую понимание им пропорциональности инерции массе. Эта гипотеза гласит: «Если бо́льшее тело соударяется с меньшим, находящимся в покое, то оно сообщает последнему некоторое движение и, следовательно, теряет несколько в своем движении».

Если масса ударяющего шара больше, чем покоящегося, то он не остановится, а будет двигаться в прежнем направлении, но с меньшей скоростью. Если же его масса меньше массы покоящегося шара, то после удара он приобретает движение в обратном направлении. Тело, испытавшее удар, в обоих случаях движется в направлении движения ударяющего тела.

Рассмотрев ряд случаев соударения тел с различной массой, Гюйгенс доказал две важнейшие теоремы механики о сохранении количества движения и «живой силы»: «Скорость, которую бо́льшее тело сообщает меньшему, находящемуся в покое, относится к скорости, которую меньшее тело, движущееся с той же скоростью, сообщает неподвижному бо́льшему, как величина бо́льшего тела к величине меньшего», и «при соударении двух тел сумма произведений из их величин на квадраты их скоростей остается постоянной до и после удара».

Эти выводы легко подтвердить с помощью прибора Мариотта, в котором шары из слоновой кости подвешены на нитях равной длины так, чтобы они соприкасались.

Отклонив один из них от положения равновесия, отпускают его, чтобы он нанес прямой центральный удар крайнему шару. Тогда на другом конце ряда отскакивает один шар, поднимаясь на ту же высоту.

Это явление объясняется так: ударивший шар передает свое количество движения (или импульс) крайнему шару, а сам останавливается; крайний шар передает этот импульс соседнему, потом следующему и так далее; наконец, последний отскакивает.

Если в приборе Мариотта удар нанесут два шара, то в этом случае и отскакивают два шара — иначе не могли бы сохраниться одновременно и количество движения и кинетическая энергия.

Например, если бы мог отскочить один шар с вдвое бóльшей скоростью, то количество движения осталось бы неизменным, но «живая сила» отскочившего шара была бы вдвое больше, чем у двух шаров, нанесших удар, что невозможно.

Изучение удара тел имело большое значение для техники. На законах соударения тел основано устройство, например, баллистического маятника, с начала XIX в. применявшегося для измерения скорости ядер и снарядов.

Баллистический маятник имеет подвешенный массивный ящик AB, внутри которого находится большой котел K, наполненный песком. Выброшенное из орудия в горизонтальном направлении ядро m попадает в песок и останавливается. Баллистический маятник приходит в движение и, откачнувшись, поднимается на некоторую высоту h.

Скорость маятника при ударе ядра равна $v = \frac{m}{M+m} V$, где m — масса ядра, M — масса ящика, V — скорость ядра в момент удара.

Кинетическая энергия всей системы равна

$$W^{(k)} = \frac{(M+m)\,v^2}{2} = \frac{m^2V^2}{2\,(M+m)}.$$

При подъеме центра тяжести маятника на высоту h кинетическая энергия системы переходит в потенциальную, равную $(M+m)gh$. Из уравнения

$$\frac{m^2V^2}{2(M+m)}=(M+m)gh$$

можно найти скорость ядра

$$V=\frac{M+m}{m}\sqrt{2gh}\ .$$

Введение в механику понятия о количестве движения, как произведении количества материи на скорость, уста-

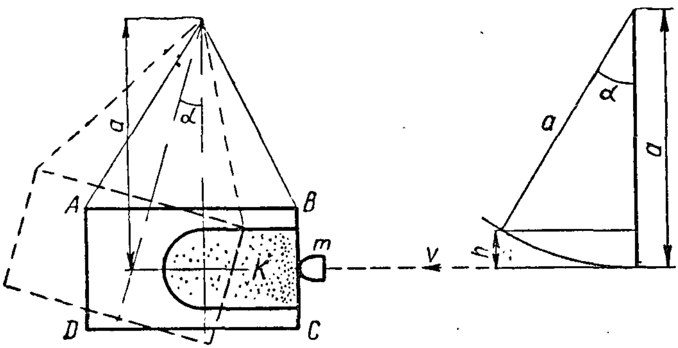

Рис. 30. Баллистический маятник.

навливало связь массы с элементами движения, позволяя ввести ее в механические расчеты. Вместе с тем количество движения было уже мерой воздействия одного тела на другое, т. е. мерой силы.

Изучение Гюйгенсом и Валлисом соударения тел подготовило почву для открытия третьего закона механики о равенстве действия и противодействия.

Таковы были успехи механики твердых тел во второй половине XVII в., явившиеся продолжением исследований Галилея.

16. МЕХАНИКА НЬЮТОНА

Исследования Галилея, Гюйгенса и других ученых XVII в. были завершены *Исааком Ньютоном* (1643—1727), который не только привел в стройную систему знания в области механики того времени, но ввел в механику новые принципы и законы.

Ньютон родился в семье небогатого фермера. Двенадцати лет его отдали в школу, где он сначала не отличался заметными успехами в учении. В дальнейшем он заинтересовался математикой, самостоятельно занимался ею и занял первое место в классе. Увлекался Ньютон и изготовлением им же самим придуманных действующих моделей мельниц и различных механизмов. Заметив интерес мальчика к математике, его родственники посоветовали матери Ньютона, которая хотела оставить сына на ферме, послать его по окончании школы в Кембриджский университет. В 1660 г. Ньютон уже был студентом.

Кембриджский университет, как и многие другие английские университеты XVII в., во многом носил еще отпечаток средневековой науки. «Возрожденческий свежий ветер нового исследования, науки Галилея, Кеплера, Декарта еще в недостаточной степени проникли через Ла-Манш. Несмотря на влияние Фрэнсиса Бэкона, в Кембридже веяло еще средневековой теологией и схоластикой» [1]. Но вместе с тем университет предоставлял полную свободу самостоятельного исследования и выступления с собственными теориями.

Своими математическими способностями Ньютон вскоре обратил на себя внимание профессора Барроу, который в 1669 г. передал занимаемую им кафедру математики Ньютону — своему бывшему ученику, уже избранному магистром колледжа.

В течение 1665—1667 гг. Ньютон из-за свирепствовавшей тогда в Англии чумы жил на ферме матери в Вульсторпе. Эти годы, по воспоминаниям самого Ньютона, были временем наибольшего подъема его творческих сил.

Именно тогда Ньютон создал метод флюксий (анализ бесконечно малых) и у него возникла идея о тяготении Луны к Земле. Он с увлечением занимался оптическими экспериментами, сам изготовлял необходимые приборы и усовершенствовал телескоп. Но мы остановимся лишь на его работах в области механики.

---

[1] С. И. Вавилов, Исаак Ньютон, изд. АН СССР, 1945, стр. 17.

Исследование механических проблем Ньютон начал в самые ранние годы своей научной деятельности (об этом свидетельствует его собственная запись, относящаяся к 1666 г.). Но тогда он оставил занятия механикой для оптических исследований и возвратился к ним только в 1679 г.

Механические исследования Ньютона были изложены им в большом труде «Математические начала натуральной философии», вышедшем в свет в 1687 г.

Невозможно переоценить значение этого труда. Данные Ньютоном принципы остались незыблемыми в классической механике. Характеризуя работы Ньютона, академик С. И. Вавилов писал: «На языке Ньютона мы думали, говорили долгое время и только теперь делаются попытки изобрести новый язык. Вот почему можно утверждать, что на всей физике лежал отпечаток его мысли; без Ньютона наука развилась бы иначе» [1].

В то же время нужно отдать должное и физикам, подготовившим почву для открытий Ньютона, который, по его собственному выражению, мог добиться больших результатов потому, что «стоял на плечах своих великих предшественников». Академик С. И. Вавилов, быть может, даже преувеличивал значение работ предшественников Ньютона, утверждая, будто «первый и второй законы в отношении практических приложений были усмотрены еще Галилеем и Декартом», а «третий закон сам Ньютон связывает с именем Гюйгенса», Ньютону же «принадлежит их общая, необычайно осторожная формулировка» [2].

Большинство историков физики признает за Ньютоном первенство не только формулировки, но и установления трех основных законов динамики.

«Ньютон совершенно определенно приписывает закон инерции и параллелограмма сил Галилею,— говорит Ф. Розенбергер,— но мы уже видели, что Галилей не рассматривал общего вопроса о сложении сил и, во всяком случае, закона параллелограмма сил не доказал» [3].

---

[1] С. И. Вавилов, Исаак Ньютон, изд. АН СССР, 1945, стр. 217—218.

[2] Там же, стр. 138.

[3] Ф. Розенбергер, История физики, Гостехтеоретиздат, т. II, 1938, стр. 223.

Ньютон начал свой труд с определения массы: «Количество материи есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее».

Придерживаясь атомистического воззрения на строение вещества, Ньютон дал теоретическое определение *плотности тела как числа частиц в единице объема*. Практически же масса измеряется весом, который пропорционален массе тела. Эта пропорциональность была установлена Ньютоном экспериментально опытами с маятником.

«Падение всех тяжелых тел на Землю,— писал Ньютон,— с одинаковой высоты (выключая неравное замедление, происходящее от ничтожного сопротивления воздуха) совершается в одинаковое время, как это уже наблюдено другими, точнейшим же образом это может быть установлено по равенству времени качаний маятника. Я произвел такое испытание для золота, серебра, свинца, стекла, песка, обыкновенной соли, дерева, воды, пшеницы. Я заготовил две круглых деревянных кадочки, равные между собою; одну из них я заполнил деревом, в другой же я поместил такой же точно груз из золота (насколько смог точно) в центре качаний. Кадочки, подвешенные на равных нитях 11 футов длиною, образовали два маятника, совершенно одинаковых по весу, форме и сопротивлению воздуха; будучи помещены рядом, они при равных качаниях шли взад и вперед вместе в продолжении весьма долгого времени. Следовательно, количество вещества в золоте... относилось к количеству вещества в дереве, как действие движущей силы на все золото к ее действию на все дерево, то есть как вес одного к весу другого» [1].

Комментируя этот текст, акад. А. Н. Крылов пишет: «Этот основной опыт Ньютона, которым он устанавливает пропорциональность между массой и весом, причем отступление в $\frac{1}{1000}$ от этой пропорциональности обнаружилось бы, был повторен с особенными предосторожностями и тщательностью Бесселем в 1828 г.».

Из опытов Ньютона следовало, что вес пропорционален массе. Действительно, по второму закону Нью-

---

[1] Ньютон, Математические начала натуральной философии. Пер. акад. А. Н. Крылова, изд. АН СССР, 1936.

тона вес тела P равен mg, где m — масса тела, g — ускорение свободного падения. При всех опытах отношение $\frac{P}{m}$, численно равное ускорению свободного падения, оставалось постоянным, так как период колебаний маятника не менялся.

Массу тел Ньютон определял и как меру инерции. «Врожденная сила материи,— писал он,— 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, и если отличается от инерции массы, то разве только воззрением на нее».

При увеличении массы маятника увеличивается движущая сила, но в той же пропорции возрастает и инерция его. В результате период колебаний остается неизменным.

Ставя перед собой цель — создание небесной механики, Ньютон должен был охарактеризовать действие центростремительной силы, удерживающей планеты на их орбитах, т. е. определить ее величину и изменение в зависимости от расстояния до притягивающего центра.

«Движущая величина центростремительной силы,— писал он,— есть ее мера, пропорциональная количеству движения, которое ею производится в течение данного времени». Эта величина пропорциональна как ускорению, так и массе тела, т. е. представляет собой величину силы, действующей на тело в гравитационном поле.

Давая эти определения, Ньютон подчеркивал, что он далек от мысли раскрыть физическую природу сил и рассматривает «силы» только как математические величины, т. е. как формальные причины движения тела.

«Название же «притяжение» (центром), «натиск» или «стремление» (к центру),— писал он,— я употребляю безразлично одно вместо другого, рассматривая эти силы не физически, а математически, поэтому читатель должен озаботиться, чтобы в виду таких названий, не думать, что я ими хочу определить самый характер действия или физические причины происхождения этих сил, или же приписать центрам (которые суть математические точки) действительно и физические силы, хотя я буду говорить о силах центров и о притяжении центрами».

Ньютон знал, что наблюдению доступны только относительные движения. «Движение и покой,— писал он,— при обычном их рассмотрении, различаются лишь в отношении одного к другому, ибо не всегда находится в покое то, что таковым простому взгляду представляется». Такие движения относят к координатам, начало которых условно принимается за неподвижное. Например, изучая движение планет, за начало координат принимают Солнце (точнее — центр массы Солнечной системы), хотя в действительности Солнце и все планеты движутся по направлению к созвездиям Лиры и Геркулеса.

Ньютон полагал, что законы механики должны быть установлены для абсолютных движений, т. е. относимых к абсолютно неподвижным координатам. Прежде чем приступить к этой задаче, он должен был точно определить понятия о пространстве и времени.

«Эти понятия общеизвестны,— писал Ньютон,— однако необходимо заметить, что они относятся обыкновенно к тому, что постигается нашими чувствами. Отсюда происходят неправильные суждения, для устранения которых необходимо вышеприведенные понятия разделить на абсолютные и относительные, истинные и кажущиеся, математические и обыденные».

Абсолютным времени, пространству и движению Ньютон дал такие определения:

«I. Абсолютное, истинное математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно, и иначе называется длительностью.

Относительное, кажущееся или обыденное время есть или точная, или изменчивая, постигаемая чувствами, внешняя, совершаемая при посредстве какого-либо движения, мера продолжительности, употребляемая в обыденной жизни вместо истинного математического времени, как-то час, день, месяц, год».

«II. Абсолютное пространство по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным.

Относительное есть его мера или какая-либо ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел и которое в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное: так, например, протяжение пространств подземного воздуха или надземного, определяемых по их положению относительно Земли. По виду и величине абсолютное и относительное пространства одинаковы, но численно не всегда остаются одинаковыми. Так, например, если рассматривать Землю подвижною, то пространство нашего воздуха, которое по отношению к Земле остается всегда одним и тем же, будет составлять то одну часть пространства абсолютного, то другую, смотря по тому, куда воздух перешел, и, следовательно, абсолютное пространство беспрерывно меняется».

«III. Место есть часть пространства, занимаемая телом, и по отношению к пространству бывает или абсолютной, или относительной...»

«IV. Абсолютное движение есть перемещение тела из одного абсолютного его места в другое, относительное — из относительного в относительное... Вместо абсолютных мест и движений пользуются относительными; в делах житейских это не представляет неудобства, в философских необходимо отвлечение от чувств. Может оказаться, что в действительности не существует покоящегося тела, к которому можно было бы относить места и движения прочих».

Отрывая абсолютные пространство и время от реальных движений, Ньютон придал этим понятиям метафизический характер.

Однако Ньютон как физик признавал принцип относительности движений.

Невозможность установить равномерное прямолинейное движение системы отсчета или, как говорят иногда, пространства, была известна еще Галилею. Он указывал, что на плывущем равномерно и прямолинейно судне явления происходят так же, как если бы оно находилось в покое.

Пассажиру, плывущему на судне и подбрасывающему вверх мяч, кажется, будто мяч движется по вертикальной линии. Наблюдатель же, находящийся на берегу, видит, что мяч, следуя за движением судна, описывает в воздухе криволинейный путь. Следовательно, описание движения мяча относительно координат, связанных с палубой судна, на котором находится наблюдатель, ничем не будет отличаться от описания движения мяча, подбрасываемого наблюдателем на берегу.

Такие системы носят название инерциальных. Изучая движение по отношению к координатам, связанным с такими системами, было установлено, что любая система отсчета, находящаяся в прямолинейном равномерном движении относительно другой системы отсчета, равноправна с ней в отношении описания механических процессов. Законы движения, установленные в одной инерциальной системе, будут справедливы и в другой такой же системе. В этом и заключается принцип относительности классической механики.

Из относительности движений следует, что изучаемая система может казаться движущейся, когда в действительности движутся тела, окружающие ее. Следовательно, наблюдатель, находящийся в такой системе, не может установить факт ее движения.

Но если система находится в ускоренном движении, то, по утверждению Ньютона, это может быть установлено находящимся в ней наблюдателем. Для доказательства этого положения Ньютон сделал следующий опыт:

«Если на длинной веревке,— говорил Ньютон,— подвесить сосуд и, вращая его, закрутить веревку, пока она не станет совсем жесткой, затем наполнить сосуд водой и, удержав сперва вместе с водою в покое, внезапным действием другой силы привести сосуд во вращение в сторону раскручивания веревки, то сосуд будет продолжать вращаться, причем это вращение будет поддерживаться достаточно долго раскручиванием веревки. Сперва поверхность воды будет оставаться плоской, как было до движения сосуда. Затем сосуд силою, постепенно действующею на воду, заставит и ее участвовать в своем вращении. По мере возрастания вращения вода будет постепенно отступать от середины сосуда и возвышаться по краям его... при усиливающемся движений она все более и более будет подниматься к краям, пока не станет обращаться в одинаковое время с сосудом и придет по отношению к сосуду в относительный покой».

Из этого опыта следовал вывод: «Проявления, которыми различаются абсолютное и относительное движения, состоят в силах стремления удалиться от оси вращательного движения, ибо в чисто относительном вращательном движении эти силы равны нулю, в истинном же и абсолютном они больше или меньше сообразно количеству движения».

Ньютон указывал, что когда вращательное движение воды относительно сосуда было наибольшим, частицы воды не проявляли никакого стремления удалиться от оси вращения. По мере же того, как относительное дви-

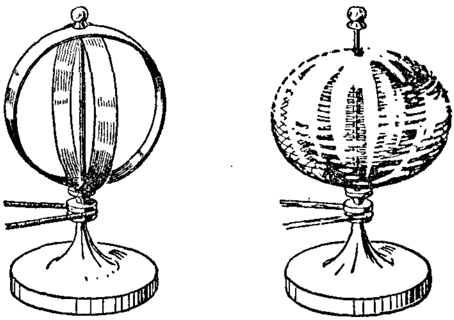

Рис. 31. Вращение металлического обруча.

жение уменьшалось и усиливалось истинное вращение воды, частицы ее все более отдалялись от оси вращения и вода поднималась у краев сосуда.

Очевидно, что вращающимся телом мы должны считать то, в котором вследствие инерции его частиц возникают деформации. При вращении обруча около одного из его диаметров (рис. 31) в нем возникают напряжения, заставляющие его сжаться вдоль оси вращения, причем, ускоряя или замедляя вращение центробежной машины, можно увеличить или уменьшить его сжатие. Отсюда мы и делаем заключение о вращении обруча, а не лаборатории, в которой производится этот опыт.

Поэтому Ньютон утверждал, что, находясь внутри огромного пустого пространства, в котором не было бы никакого другого тела, кроме двух соединенных нитью шаров, можно было бы установить вращение шаров вокруг их общего центра тяжести по натяжению нити.

Исходя из определений времени, пространства и движения, Ньютон сформулировал следующие аксиомы, или законы механики:

«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 собою равны и направлены в противоположные стороны».

Формулировка первого закона предполагает, что понятие о прямой линии твердо установлено и что имеется возможность определять равномерность движения, т. е. измерять время. Понятие о прямой линии дается геометрией Евклида. Равномерность движения определяется по отношению к вращению Земли.

Этот закон дан в явно относительной форме, т. е. справедлив для инерциальных систем. Принцип относительности Ньютон выразил в такой форме: «Относительные движения друг по отношению к другу тел, заключенных в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится это пространство или движется равномерно и прямолинейно без вращения» и «если несколько тел, движущихся как бы то ни было относительно друг друга, будет подвергнуто действию равных ускоряющих сил, направленных по параллельным между собою прямым, то эти тела будут продолжать двигаться друг относительно друга так же, как если бы сказанные силы на них не действовали».

Второй закон механики был сформулирован Ньютоном так, что масса тела не входила в него в явной форме.

Как отмечал академик С. И. Вавилов, «изменение количества движения может рассматриваться, как совершенно самостоятельная величина,— импульс, измеряемая и ощущаемая нами совершенно независимо от массы и скорости» [1]. Придав значку Δ значение изме-

---

[1] С. И. Вавилов, Исаак Ньютон, изд. АН СССР, 1945, стр. 136.

нения, можно второй закон Ньютона выразить формулой $\Delta(mv) = F\Delta t$, где m — масса, v — скорость, F — сила, t — время, в течение которого происходит изменение количества движения. Или, считая массу неизменной величиной, $F = m\frac{\Delta v}{\Delta t} = ma$, где a — изменение скорости, т. е. ускорение (положительное или отрицательное). Так обычно и формулируется второй закон Ньютона в современной механике: сила равна произведению массы на ускорение. В такой форме этот закон легко проверить на опыте с машиной Атвуда (рис. 32). Два тела равной массы m, висящие на переброшенной через блок нити, находятся в равновесии. Прибавляя к одному из них тело, масса которого равна n, получим систему с массой $2m + n$, движущуюся под действием силы ng, где g — ускорение силы тяжести, равное 981 *см/сек*^{2}. Пренебрегая моментом, необходимым для приведения во вращение блока, найдем: $ng = (2m + n)a$, где a — ускорение системы. Отсюда $a = \frac{ng}{2m+n}$. Величина ускорения a находится по длине пути l, пройденного грузом $m + n$ в течение времени t, из формулы $l = \frac{at^2}{2}$.

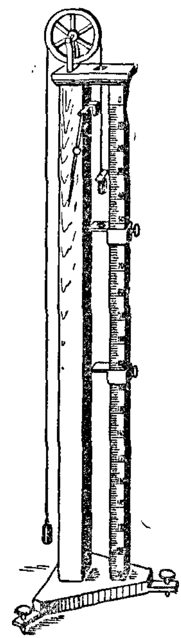

Рис. 32. Машина Атвуда.

Из первых двух законов вытекал принцип независимости действия сил, на основании которого Ньютон впервые сформулировал правило сложения сил: под общим действием двух сил тело проходит за данное время диагональ параллелограмма, стороны которого оно прошло бы под действием тех же сил, взятых в отдельности.

Исходя из приведенной выше формулировки принципа сложения сил, можно сделать два очевидных заключения.

Во-первых, если материальная точка принуждена под действием сил двигаться по двум различным направлениям, то она должна проходить по диагонали параллелограмма, стороны которого — пути точки под действием каждой из сил в отдельности.

Во-вторых, равнодействующая двух сил, приложенных к одной точке, по величине пропорциональна диагонали параллелограмма, построенного на этих силах, а по направлению совпадает с ней. Если на точку действуют несколько сил, то равнодействующая находится путем последовательного сложения их попарно.

Материальная точка, находящаяся под действием нескольких, различно направленных сил, сохраняет равновесие в том случае, если равнодействующая всех этих сил равна нулю.

Так Ньютон объединил статику и динамику, указав метод отыскания условий равновесия тел на основе законов динамики. Этот метод дает возможность найти «соотношения между усилиями в машинах, составленных из колес, барабанов, воротов, рычагов, блоков, натянутых канатов и других механизмов, и весами грузов, поднимаемых или прямо, или наклонно, а также силы связок, приводящих в движение кости животных».

Третий закон был выведен Ньютоном из наблюдений и опыта. В письме к редактору второго издания «Начал» он дал следующее доказательство третьему закону: «Если бы некоторое тело могло притягивать другое, расположенное поблизости, но не притягивалось бы само с такою же силой этим последним, то тело, притягивающее менее сильно, погнало бы другое перед собой и оба они начали бы двигаться с ускорением до бесконечности, что противоречит первому закону движения».

Из второго и третьего законов Ньютон вывел важные следствия: 1) количество движения системы, не подвергающейся действию внешних сил, остается неизменным при любых взаимодействиях тел, входящих в систему; 2) «центр тяжести системы двух или нескольких тел от взаимодействия тел друг на друга не изменяет ни своего состояния покоя, ни движения; поэтому центр тяжести системы всех действующих друг на друга тел (при отсутствии внешних действий и препятствий) или находится в покое, или движется равномерно и прямолинейно». Таким образом, принцип инерции применим не только к отдельным телам, но и к центру тяжести системы взаимодействующих тел при отсутствии внешнего воздействия на систему.

Третий закон подтверждался как опытами с соударяющимися шарами, производившимися еще до опубликования Ньютоном «Начал» французским физиком Мариоттом (1620—1684), так и опытами, ставившимися с большой точностью самим Ньютоном.

Третий закон справедлив не только для тел, соприкасающихся между собой или имеющих материальные связи, но и для тел, действующих друг на друга на расстоянии. Для экспериментального доказательства этого явления Ньютон использовал притяжение между магнитом и железом. «Я производил,— писал он,— подобный опыт с магнитом и железом; если их поместить каждый в отдельный сосуд и пустить плавать на спокойной воде так, чтобы сосуды взаимно касались, то ни тот, ни другой не приходят в движение, но вследствие равенства взаимного притяжения сосуды испытывают равные давления и остаются в равновесии».

В «Началах» Ньютона уже было введено понятие о силах инерции. «Врожденная сила материи,— писал Ньютон,— есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно предоставлено самому себе, удерживает свое состояние покоя или прямолинейного движения». Разъясняя это положение, Ньютон говорит: «Эта сила всегда пропорциональна массе и если отличается от инерции массы, то разве только воззрением на нее. От инерции материи происходит, что всякое тело лишь с трудом выводится из своего покоя или движения. Поэтому «врожденная сила» могла бы быть весьма вразумительно названа «силой инерции». Эга сила проявляется телом единственно, лишь когда другая сила, к нему приложенная, производит изменение в его состоянии».

Данное в такой форме понятие о силах инерции повело к недоразумениям. Утверждали, что свободное тело «сопротивляется» действию на него силы вследствие «стремления» сохранить свое состояние покоя или движения.

В действительности же взаимодействие тел вполне определяется вторым и третьим законами. Никакого «сопротивления» силе свободное тело не оказывает. В тот же момент, когда сила подействовала на тело, оно получает ускорение, обратно пропорциональное своей массе. Если масса тела очень значительна, а действующая на него сила не велика, то будет очень мало и сообщаемое телу ускорение. Например, упавший на Землю метеорит сообщает ей ускорение, но оно так незначительно, что не может быть замечено.

Понятие о «силе инерции» в ньютоновском смысле вытекает из третьего закона динамики. Если какое-нибудь тело A испытывает ускорение вследствие действия на него тела B, то противодействие тела A на тело B может быть названо силой инерции. Например, колеса движущегося поезда на закруглении пути испытывают давление рельсов, сообщающее им центростремительное ускорение. Сами же они, по третьему закону Ньютона, давят на рельсы, и это давление есть сила инерции.

Иной смысл имеет понятие о силах инерции в принципе Даламбера, как он формулируется в современной механике, о чем будет сказано дальше.

Динамика Ньютона была продолжением и развитием учения Галилея о движении брошенных тел. Она давала уже возможность найти законы движения планет, если известны силы, действующие на них со стороны Солнца.

17. РАЗВИТИЕ ОСНОВ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ

Пока господствовала система эпициклов Птолемея, было невозможно применить механику к движению космических тел. Обращение планет около центров эпициклов — ничем не отмеченных точек пространства — не могло быть объяснено законами механики. Кроме знания основ динамики, для построения механики небесных тел нужно определить силу, под влиянием которой планеты обращаются вокруг Солнца.

Представление о тяжести как космическом, а не только земном явлении возникло еще в XV в.

Постепенно стала созревать идея, что тяжесть есть стремление тел друг к другу или, как выражались ученые средних веков, стремление частей тела к воссоединению. Эта мысль в более или менее ясной форме высказывалась мыслителями того времени, например Леонардо да Винчи и Николаем Кузанским, которые предполагали, что явление тяжести должно наблюдаться и на других космических телах — Луне, Солнце и планетах.

Коперник тоже видел в тяжести «устремление, которым божественное провидение творца мира одарило части для сочетания и соединения их в единое целое в форме сферы. Такое стремление свойственно, вероятно, Солнцу, Луне и прочим блуждающим светилам и благодаря его действию они сохраняют свою очевидную шаровидность» [1].

Ученых XVI—XVII вв. интересовала мысль о природе тяготения, которое обычно сравнивали с магнитным притяжением.

Впервые мысль о тяготении возникла в связи с исследованием магнитного притяжения и была высказана английским ученым *Гильбертом* (1540—1603), занимавшимся исследованием явлений магнетизма. Гильберт отождествлял взаимное притяжение магнитов и тяготение.

«Сила, истекающая из Луны,— писал он,— достигает до Земли и подобным же образом магнитная сила Земли пробегает все небесное пространство до Луны... Действие Земли, однако, гораздо значительнее вследствие ее большой массы. Земля притягивает Луну и снова отталкивает ее от себя; то же делает в свою очередь Луна с Землей в определенных границах. Взаимодействие, однако, не сближает тел наподобие магнитных сил, а лишь заставляет их непрерывно вращаться одно около другого» [2].

Гильберт не был механиком и не занимался специально проблемами космологии. Однако идея о взаимном притяжении между Землей и Луной высказана им вполне отчетливо. Незнание Гильбертом принципа инерции тел, введенного в науку Галилеем только в 1638 г., заставляло его прибегать к гипотетическому отталкиванию, будто бы действующему между Землей и Луной наряду с притяжением.

Мысль о тяготении тел к Земле несколько позднее была развита знаменитым немецким астрономом *Иоганном Кеплером* (1571—1630), который в сочинении «Новая астрономия или небесная физика с комментариями

---

[1] Н. Коперник, Об обращениях небесных сфер. Сб. «Николай Коперник», изд. АН СССР, 1947, стр. 208.

[2] Ф. Розенбергер, История физики, т. II, ОНТИ, 1935, стр. 71.

о движении Марса» (1609) объяснял тяжесть стремлением сродных тел к соединению, подобным магнитному притяжению, и *писал*: «Если бы два камня находились в таком месте, где не действуют другие тела, то они сошлись бы вместе, как два магнита. Точно так же Земля и Луна соединились бы друг с другом, если бы некоторая одушевленная сила не поддерживала бы Луну в постоянном вращении. Силу притяжения между Землей и Луной легко заметить по морским приливам. Вода перетекла бы целиком на Луну, если бы не удерживалась Землей» [1].

В том же сочинении Кеплер опровергал господствовавшее в его время воззрение, будто бы все тяжелые тела стремятся к математической точке — центру вселенной — и объяснял падение тел к центру Земли ее шаровидной формой. Притяжение Земли распространялось им и на Луну, причем он считал, что Луна, если бы ее не удерживала некая «живая сила», приблизилась бы к Земле «на 53 части, а Земля на одну часть их взаимного расстояния, если предположить плотность обоих тел одинаковой».

Этим заявлением Кеплер не только резко порывал с аристотелианским представлением о притяжении космических тел к «центру Вселенной», но и утверждал физическую природу притяжения между ними.

Действием силы притяжения Луны Кеплер объяснял морские приливы: на месте, над которым вертикально стоит Луна, образуется на морской воде «гора»; эта «гора», или волна, следует за движением Луны вокруг Земли, но в конце концов она опаздывает, так как не может сравняться с Луной в скорости.

Кеплеру удалось открыть три закона, которым подчиняется движение планет вокруг Солнца.

В начале 1600 г. Кеплер принял приглашение знаменитого датского астронома *Тихо Браге* (1546—1601) занять место его помощника в обсерватории близ Праги.

Работая на этой обсерватории, Кеплер близко познакомился с «неравенствами» движения планет. После смерти Тихо Браге Кеплер был назначен «императорским математиком» и, получив в свое распоряжение

---

[1] С. И. Вавилов, Исаак Ньютон, изд. АН СССР, 1945, стр. 113.

запись наблюдений Тихо Браге, продолжил начатое им составление таблиц. Обрабатывая результаты точных наблюдений движения Марса, Кеплер тщетно пытался согласовать их с равномерным движением по окружности, принятым в системе Коперника. Тогда он предположил, что Марс движется вокруг Солнца не по окружности, а по эллипсу и неравномерно. Ему удалось подобрать эллипс, движение по которому с переменной скоростью вокруг Солнца, находящегося в одном из его фокусов, совпадало с наблюдаемыми положениями Марса на небесной сфере.

Так были открыты Кеплером два первых его закона.

Эти законы опубликованы Кеплером в упомянутом выше сочинении «Новая астрономия».

Первый закон определяет форму пути планеты. Этот путь — эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Второй закон определяет изменение скорости планеты. Скорость планеты во время ее обращения вокруг Солнца изменяется так, что радиусы-векторы (т. е. отрезки прямой линии, соединяющей планету с Солнцем) описывают в равные времена одинаковые площади.

Значительно позднее у Кеплера появилась мысль найти соотношения между периодами обращения планет и их средними расстояниями от Солнца.

Так, делая различные предположения и проверяя их, Кеплер открыл третий закон, опубликованный им в 1619 г. в сочинении «Гармония мира».

Третий закон Кеплера связывает средние расстояния планет от Солнца с периодами их обращения: квадраты времен обращения планет относятся как кубы их средних расстояний от Солнца.

Проверка третьего закона требовала знания не истинных, а только относительных расстояний планет от Солнца; они были определены еще Коперником из наблюдений наибольших расстояний Венеры и Меркурия от Солнца и сравнения относительной величины «петель», которые делают Марс, Юпитер и Сатурн в течение года среди звезд.

Приняв за единицу расстояние Земли от Солнца и период ее годичного обращения, для периодов обращения и средних расстояний других планет он получил таблицу:

	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн
Период	0,24	0,615	1,0	1,88	11,86	29,457
Среднее расстояние	0,387	0,723	1,0	1,524	5,203	9,539

Легко видеть, что квадраты чисел верхнего ряда относятся, как кубы чисел нижнего ряда.

Галилей не мог понять значения найденных Кеплером законов движения планет. В одном из своих писем Галилей, подчеркивая противоположность своих и Кеплера взглядов, писал: «Меня берет сомнение, не ведут ли соображения Ландсберга[1] и Кеплера скорее к преуменьшению значения учения Коперника, чем к его утверждению, так как мне кажется, что они оба зашли, что называется, слишком далеко; поэтому многие, переваривая их фантазии и, быть может, принимая их за мысли самого Коперника, будут, мне думается, не без основания хохотать над подобной доктриной»[2].

В «Диалоге о двух системах мира» Галилей совершенно избегал вопроса о тех «неравенствах» в движениях планет, которые объясняются эллиптичностью их орбит. Подобно Копернику, он находился еще во власти идеи о равномерном движении планет по круговым орбитам, и мнение об эллиптичности их он рассматривал, как отступление от учения Коперника.

Галилей не мог на основе своей динамики объяснить движение планет, не признавая тяготения их к Солнцу, а Кеплер, очень близкий к открытию всемирного тяготения, был еще аристотелианцем в области динамики. Он объяснял поступательное движение планет по орбитам действием какой-то силы, исходящей из Солнца и подталкивающей планеты в направлении их движения.

Новое поколение ученых, пользуясь открытыми Галилеем законами движения тел под действием постоян-

---

[1] Филипс фон Ландсберг (1561—1632) — астроном, составивший таблицы планетных движений, пользуясь законами Кеплера.

[2] Н. И. Идельсон, Галилей в истории астрономии. Сб. «Галилео Галилей», изд. АН СССР, 1943, стр. 86.

ной силы, сумело использовать идею Кеплера о притяжении между небесными телами и довольно верно представить себе, пока лишь с качественной стороны, механизм системы Коперника.

Например, итальянский ученый *Борелли* (1608—1679) в своей работе об обращении спутников Юпитера писал: «Предположим, что планета стремится к Солнцу и в то же время своим круговым движением удаляется от этого центрального тела, лежащего в середине круга. Если обе противоположные силы равны между собой, то они должны уравновеситься. Планета не будет в состоянии ни приблизиться к Солнцу, ни отойти от него дальше известных пределов, и в таком равновесии будет продолжать свое обращение около Солнца»[1].

Так постепенно созревала в умах ученых мысль о всемирном тяготении, управляющем движением планет.

Наконец, в 1674 г. английский физик *Роберт Гук* (1635—1703) опубликовал большую статью «Попытка доказательства годичного движения на основании наблюдений», в которой писал: «Я изложу систему мира, во многих частностях отличающуюся от всех до сих пор известных систем, но во всех отношениях согласную с обычными механическими законами. Она связана с тремя предположениями. Во-первых, все небесные тела 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... Второе предположение состоит в том, что каждое 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. Третье предположение заключается в том, что притягивающие силы действуют тем больше, чем ближе тело, на которое они действуют, к центру притяжения»[2].

Раскрыв интуитивно механизм солнечной системы, Гук не мог математически обосновать свою гипотезу,

---

[1] С. И. Вавилов, Исаак Ньютон, изд. АН СССР, 1945, стр. 115.

[2] Там же, стр. 116—117.

хотя, применив ее, например, к обращению Луны вокруг Земли и рассматривая положение Луны на орбите как результат равновесия между притяжением ее к Земле и действующей на нее инерционной центробежной силой, можно было математически доказать тождественность всемирного тяготения с тяжестью.

Знания законов динамики, открытых Галилеем, и исследований Гюйгенса было достаточно, чтобы объяснить механизм обращения Луны вокруг Земли и планет вокруг Солнца, исходя из идеи, высказанной Борелли и Гуком. Но сделать это оказалось по силам только Ньютону.

Вот что говорил Ньютон о возникновении у него идеи о тяготении в одном из своих писем: «...я начал думать о тяготении, простирающемся до орбиты Луны, и нашел, как оценить силу, с которой шар, вращающийся внутри сферы, давит на поверхность этой сферы. Из правила Кеплера о том, что периоды обращения планет находятся в полуторной пропорции к расстоянию от центров их орбит, вывел, что силы, удерживающие планеты на их орбитах, должны быть в обратном отношении квадратов их расстояний от центров, вокруг коих они вращаются. Отсюда я сравнивал силу, требующуюся для удержания Луны на ее орбите, с силой тяжести на поверхности Земли и нашел, что они почти отвечают друг другу[1].

Еще в 1665—1667 гг. Ньютон сделал попытку проверить математически, не удерживается ли Луна на своей орбите тяготением к Земле, или, другими словами, не падает ли она постоянно на Землю, что и отклоняет ее от прямолинейного пути в пространстве.

Для этого нужно было установить, во-первых, совпадает ли действительное отклонение Луны от касательной к ее орбите с тем, какое должна произвести сила тяжести на расстоянии, равном расстоянию до Луны, в предположении, что эта сила изменяется в обратном отношении к квадрату расстояния, и, во-вторых, тождественна ли по своей природе сила, отклоняющая Луну, с тяжестью на земной поверхности.

Из элементов движения Луны Ньютон получил уско-

---

[1] С. И. Вавилов, Исаак Ньютон, изд. АН СССР, 1945, стр. 110—111.

рение, с которым движется Луна по направлению к Земле (центростремительное ускорение). Зная же ускорение свободного падения на земной поверхности и принимая расстояние Луны от центра Земли равным 60 земным радиусам, он вычислил ускорение тела, падающего на Землю с высоты Луны.

Однако, вычислив ускорение, сообщаемое ему силой тяжести на «высоте», равной расстоянию до Луны, Ньютон не нашел удовлетворительного совпадения с центростремительным ускорением Луны, вычисленным исходя из линейной скорости движения Луны по орбите и расстояния ее от Земли. Это несогласие вычисленного ускорения с фактическим, как оказалось позднее, произошло потому, что тогда еще не была известна точная длина земного радиуса.

Потерпев неудачу, Ньютон не занимался более этим вопросом до того времени, пока не было сделано новое градусное измерение *Пикаром* (1620—1682), по данным которого радиус Земли был определен довольно точно. Проверив свое вычисление и используя новую величину длины земного радиуса, Ньютон получил вполне удовлетворительные результаты, но не опубликовал их.

Между тем проблема планетных движений привлекала все большее внимание.

В 1683 г. друг Ньютона астроном *Эдмунд Галлей* (1656—1742) доказал (исходя из третьего закона Кеплера), что сила притяжения Солнцем планет должна изменяться обратно пропорционально квадрату расстояний. Но его попытки установить, по какой орбите должно двигаться тело под действием центральной силы, изменяющейся обратно пропорционально квадрату расстояний, не увенчались успехом.

Архитектор *Врен* (1632—1723), один из основателей Лондонского Королевского общества, интересовавшийся теоретической астрономией, предложил даже небольшую премию тому, кто решит эту задачу. Гук немедленно же вызвался вывести кеплеровы законы из гипотезы центральной силы, но, не владея в достаточной степени математикой, конечно, не мог выполнить своего обещания.

Когда же в следующем году Галлей посетил Ньютона и рассказал об этих попытках, то узнал, что Ньютон уже разработал теорию движения планет в предположении существования центральной силы — всемирного тяготения.

Галлей настаивал на немедленном опубликовании его труда, однако Ньютон считал необходимым продолжить разработку своей механики.

Через год после этого Ньютон представил Лондонскому Королевскому обществу рукопись «О движении» с просьбой не опубликовывать ее, а лишь зарегистрировать на случай защиты приоритета. Еще через год, т. е. в 1686 г., была получена от Ньютона рукопись «Математические начала натуральной философии», в которой, согласно записи в протоколах Лондонского Королевского общества, «дается математическое доказательство гипотезы Коперника в том виде, как она была предложена Кеплером, и все небесные движения объясняются на основании единственного предположения о тяготении к центру Солнца, обратно пропорциональном квадрату расстояния»[1].

Благодаря деятельному участию Галлея, взявшего на себя даже расходы по изданию «Математических начал», этот бессмертный труд вышел в свет уже в 1687 г.

В сочинении Ньютона был строго математически разрешен вопрос о связи между центральным характером силы и теоремой о площадях, описываемых радиусом-вектором, соединяющим движущуюся материальную точку с центром. Затем доказано, что при движении, согласующемся с законами Кеплера, тело должно находиться под влиянием центростремительной силы, направленной к фокусу эллипса, параболы или гиперболы и изменяющейся обратно пропорционально квадрату расстояния от этого фокуса.

Примечание.

Центростремительное ускорение планеты $g=\frac{v^2}{r}$, где v — линейная скорость на орбите, r — расстояние от центра Солнца. Но $v=\frac{2\pi r}{t}$, где t — время обращения планеты вокруг Солнца. Следовательно, $g=\frac{4\pi^2r^2}{t^2r}=\frac{4\pi^2r}{t^2}$.

[1] С. И. Вавилов, Исаак Ньютон, изд. АН СССР, 1945, стр. 122.

Отношение ускорений двух планет равно

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{4\pi^2 r_1}{t_1^2} : \frac{4\pi^2 r_2}{t_2^2} = \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{t_2^2}{t_1^2}.$$

По третьему же закону Кеплера $\frac{t_2^2}{t_1^2} = \frac{r_2^3}{r_1^3}$, следовательно,

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{r_2^3}{r_1^3} = \frac{r_2^2}{r_1^2}.$$

Наконец, был дан способ определения орбиты тела, движущегося с определенной скоростью и находящегося под действием центральной силы, которая изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от центра притяжения.

На примере Луны Ньютон установил, что всемирное тяготение тождественно с силой тяжести.

Для доказательства этого положения Ньютон приводит в III книге «Начал» следующее «Поучение»: «Если бы около Земли обращалось несколько лун, подобно тому как около Юпитера и Сатурна, то времена их обращений... следовали бы законам, открытым Кеплером, и поэтому их центростремительные силы были бы... обратно пропорциональны квадратам расстояний. Если бы наинизшая из этих лун была малой и почти что касалась бы вершин высочайших гор, то центростремительная сила, которою она удерживалась бы на своей орбите, равнялась бы приблизительно силе тяжести на вершине этих гор; если бы этот спутничек лишить его поступательного движения по орбите, то вследствие отсутствия центробежной силы, от которой он продолжает оставаться на своей орбите, он под действием предыдущей стал бы падать на Землю и притом с такою же скоростью, с какою на вершинах этих гор падают тяжелые тела, ибо в обоих случаях действующие силы равны. Если бы та сила, под действием которой падал бы этот маленький низший спутничек, была отлична от силы тяжести, спутничек же этот, подобно всем телам, тяготел бы к Земле одинаково с телами, находящимися на вершинах гор, то под совокупным действием обеих сил, он падал бы вдвое быстрее. Поэтому, так как обе силы, то есть действующая на тяжелые тела и действующая на спутничек, направлены к центру Земли и между собою подобны и равны, они те же самые и имеют ту же самую причину. Следовательно, та сила, которою Луна удерживается на своей орбите, есть та же самая, которую мы называем силою тяжести, ибо в противном случае или сказанный спутничек на вершинах гор не имел бы тяжести, или же падал бы вдвое скорее, нежели падают тяжелые тела».

Тщательность, с которой показывает Ньютон в этом «Поучении» тождественность всемирного тяготения и тяжести, свидетельствует о том, насколько новой и трудно понимаемой была еще эта идея в его время.

Открытие Ньютона заключалось в установлении равенства центростремительного ускорения Луны и ускорения тела, падающего на Землю с высоты, равной расстоянию Луны от земной поверхности. Пользуясь установленными им законами динамики, Ньютон нашел и силу взаимного тяготения между Землей и Луной.

Из закона о равенстве действия противодействию следует, что когда тело под действием притяжения Земли падает на земную поверхность, то и сама Земля под влиянием тела приобретает ускорение по направлению к нему.

Сила притяжения тела Землей равна mg, где m — его масса, g — ускорение свободного падения. Тело же притягивает Землю с силой Mg_1, где M — масса Земли, g_1 — ее ускорение. Так как эти силы равны, то $mg = Mg_1$ и $\frac{g_1}{g} = \frac{m}{M}$, т. е. ускорение Земли во столько раз меньше ускорения тела, во сколько раз масса последнего меньше массы Земли. Практически, конечно, ускорение Земли не может быть замечено вследствие своей ничтожной величины.

Определим, с какой силой действует Земля на Луну. Положим, что тело, масса которого равна единице, сообщает другому телу той же массы ускорение k. Это ускорение может быть определено только из опыта. Если эти тела будут удалены друг от друга на расстояние r, то ускорение уменьшится в обратном отношении к квадрату расстояния $\left(\frac{k}{r^2}\right)$. При увеличении первого тела до массы Земли M во столько же раз увеличилось бы и ускорение к нему второго тела (так как каждая частица одного тела действует на каждую частицу другого), т. е. стало бы равным $k \cdot \frac{M}{r^2}$. Если второе тело приобрело бы массу Луны m, то ускорение это осталось бы прежним, потому что все тела падают с одинаковой скоростью независимо от их веса или массы (это было доказано еще Галилеем).

Сила, сообщающая телу ускорение, по определению Ньютона, пропорциональна массе этого тела и его ускорению. Следовательно, тяготение Луны к Земле выражается формулой $f = k\frac{Mm}{r^2}$, т. е. взаимное притяжение между Землей и Луной пропорционально произведению их масс и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними.

Закон тяготения Ньютон распространил на движение планет и комет вокруг Солнца и вообще на движение всех космических тел. Система Коперника представляла лишь кинематическую схему движения планет. Ньютон дал динамику солнечной системы.

Небесная механика Ньютона, основанная на законе всемирного тяготения, находилась в противоречии с господствовавшими тогда воззрениями картезианцев, объяснявших движение планет увлечением их вихревыми течениями в материи, заполняющей мировое пространство. Ньютон должен был поэтому доказать несостоятельность картезианского представления о причинах движения планет.

Рассматривая во второй книге «Начал» проблему движения шара в вязкой жидкости, Ньютон пришел к выводу, что «небесные пространства, через которые планетные и кометные шары повсюду непрестанно движутся совершенно свободно и без всякого заметного уменьшения своего количества движения, совершенно лишены какой-либо телесной жидкости, за исключением, может быть, чрезвычайно тонких паров». Он показал невозможность объяснения законов движения планет, исходя из концепции вихрей Декарта: если планеты «несутся вихрями, вращающимися около Юпитера или Солнца, то и эти вихри должны вращаться по таким же законам. Но времена обращений частей вихря оказываются пропорциональными квадратам расстояний», тогда как квадраты времен обращений планет относятся, как кубы их расстояний от Солнца.

Расчет Ньютона не вполне правилен, так как тогда было неизвестно еще понятие о моменте количества движения. Пользуясь этим понятием, можно доказать пропорциональность времен обращения частей вихря не квадратам, а кубам расстояний. Однако и в этом случае планеты, увлекаемые вихрем, не двигались бы согласно третьему закону Кеплера, как это наблюдается в действительности.

Далее Ньютон доказал, что если уносимое вихрем тело движется по одной и той же орбите, не удаляясь и не приближаясь к центру вращения, то оно должно обладать той же плотностью, как и вещество вихря, тогда как планеты по теории Декарта гораздо плотнее его. Кроме того, планеты обращаются по эллипсам, радиус-вектор которых описывает в равные времена одинаковые площади, а части вихря не могут совершать такого движения.

Исследование вихревого движения в жидкости позволило Ньютону сделать заключение, что «гипотеза вихрей совершенно противоречит астрономическим явлениям и приводит не столько к объяснению движений небесных тел, сколько к их запутыванию». В то же время закон всемирного тяготения дал возможность Ньютону вычислить высоту морского прилива, неправильности в движении Луны, происходящие вследствие возмущающей силы Солнца, предварение равноденствий и элементы кометных орбит. Движения космических тел «подчинились», таким образом, законам обычной земной динамики.

Закон всемирного тяготения объяснял движения всех тел Вселенной — от метеоритов и комет до планет и звезд. Он лег в основу «небесной механики», изучающей движение космических тел. Однако сразу же стала ясной сложность применения этого закона к общему случаю движения тел, из которых каждое тяготеет к каждому из всех других тел, также тяготеющих к нему. Задача упрощалась в том случае, когда можно было пренебречь притяжением некоторых тел вследствие их небольшой массы или очень больших расстояний.

Признание закона всемирного тяготения не сразу стало всеобщим. Только с 40-х годов XVIII в. в вопросе объяснения движения небесных тел ученые были вынуждены отойти от представления Декарта и стать на точку зрения Ньютона.

18. НЬЮТОНИАНСТВО И КАРТЕЗИАНСТВО В МЕХАНИКЕ

Проблемы абсолютного пространства и времени, природы механических сил и строения материи продолжали занимать ученых в течение всего XVIII в. Особенно большое внимание привлекала проблема о природе всемирного тяготения.

Установив закон всемирного тяготения как формальную причину искривления пути космических тел, Ньютон отнюдь не утверждал, что тела обладают свойством взаимно притягивать друг друга на расстоянии. В III правиле третьей книги «Начал» он с присущей ему осторожностью писал: «Свойства тел постигаются не иначе, как испытаниями; следовательно, за общие свойства надо принимать те, которые постоянно при опытах обнаруживаются и которые, как не подлежащие уменьшению, устранены быть не могут. Понятно, что в противность ряду опытов не следует измышлять на авось каких-либо бредней, не следует также уклоняться от сходственности в природе, ибо природа всегда проста и всегда сама с собой согласна... Всеобщее тяготение подтверждается даже сильнее, нежели непроницаемость тел, для которой по отношению к телам небесным мы не имеем никакого опыта и никакого наблюдения. Однако я отнюдь не утверждаю, что тяготение существенно для тел. Под врожденной силой я разумею единственно только силу инерции. Она неизменна. Тяжесть при удалении от Земли уменьшается».

В «Общем поучении», которым Ньютон закончил свой труд, он писал: «Причину же... силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю... Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам, и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря».

Для исследования движения тел под действием взаимного тяготения достаточно факта, что тяготение действительно наблюдается и его можно ввести в формулы в качестве силы, действующей между телами. Ньютон и подходил к этому вопросу как математик, избегая вопроса о природе сил тяготения. Он не считал возможным признать действие тел на расстоянии: «Я считаю нелепостью допущение, будто тело, находящееся на некотором расстоянии от другого тела, может действовать на него через пустое пространство без всякого посредства». Когда же Ньютон говорил о взаимном «притяжении», то он подразумевал «вообще какое бы то ни было стремление тел к взаимному сближению, происходит ли это стремление от действия самих тел... или это стремление вызывается эфиром или воздухом, или вообще какою-либо средою...» Он исследовал «не виды сил и физические свойства их, а лишь их величины и математические соотношения между ними», о которых можно судить по сообщаемому телам движению. Однако, отказываясь высказаться определенно о природе тяготения, Ньютон выразил все-таки отрицательное мнение о возможности родства между тяжестью и магнитными силами, к чему были склонны ученые XVII в. По этому поводу он писал в третьей книге «Начал»: «Сила тяжести иного рода, нежели сила магнитная, ибо магнитное притяжение не пропорционально притягиваемой массе: одни тела притягиваются сильнее, другие — слабее, большая часть совсем не притягивается. Магнитная сила в том же самом одном теле может быть увеличиваема и уменьшаема, иногда она даже гораздо больше, относя к массе, нежели сила тяжести; при удалении от магнита она убывает не обратно пропорционально квадратам расстояний, а ближе к кубам, поскольку я мог судить по некоторым грубым опытам».

Этими высказываниями и ограничиваются сведения о воззрениях Ньютона на природу тяготения, если не считать ставших лишь недавно известными его предположений, высказанных в частной переписке и не представляющих особого интереса для истории механики.

Физики-картезианцы, мыслившие материалистически, не хотели понять Ньютона и принять его теорию. Объясняя качественно движение планет гипотезой Декарта, они не искали количественных отношений между элементами движения планет. Взаимное тяготение между телами казалось им возвратом к аристотелианству с его «скрытыми качествами», и они отрицали иное воздействие тел друг на друга, кроме удара или давления.

С другой стороны, ньютонианцы, увлеченные успехами в объяснении движения планет и морских приливов всемирным тяготением, впали в крайность. Забыв осторожность самого Ньютона, они приписали телам свойство притягивать к себе другие тела, действуя на расстоянии без посредства материальной среды.

Это направление получило яркое выражение в предисловии ко второму изданию «Математических начал», написанном учеником Ньютона молодым математиком *Рожером Котсом.*

Котс с большой ясностью изложил сущность воззрений ньютонианцев в следующих положениях: «Все земные тела тяготеют к Земле. Уже давно подтверждено многочисленными опытами, что не существует истинно легких тел. То, что обычно называется легкостью, не есть истинная легкость, а лишь относительная, кажущаяся, происходящая от преобладающей тяжести тел окружающих.

Если все тела тяготеют к Земле, то и Земля равным образом тяготеет ко всем телам. Что тяготение между Землей и телами есть действие взаимное и соответственно равное, обнаруживается следующим рассуждением. Вообразим, что весь объем Земли подразделен на две какие бы то ни было части, равные или неравные между собою; тогда если бы их тяготения друг к другу не были бы между собою равны, то меньшее уступило бы большему, и по соединении частей они стали бы двигаться по прямой линии, уходя в бесконечность в ту сторону, куда направлено большое усилие, что совершенно противоречит опыту. Таким образом, тяготения частей друг к другу взаимно уравновешиваются, то есть действия тяготения взаимны и между собою равны.

Веса тел, равноотстоящих от центра Земли, относятся между собою как количества материи или массы тел. Об этом заключают по равенству ускорения всех падающих под действием веса тел, ибо силы, сообщающие неравным массам равные ускорения, должны быть пропорциональны массам, приводимым в движение. Равенство же ускорений всех падающих тел следует из того, что в бойлевой пустоте, то есть когда сопротивление воздуха устранено, все падающие тела проходят в равные времена равные пространства. Более же точно это подтверждается опытами над маятниками.

Притягательные силы тел при равных расстояниях пропорциональны массам тел. В самом деле, как тела Землею, так обратно и Земля телами притягиваются с равными усилиями, то есть вес Земли на каждом из этих тел в отдельности, иначе — та сила, с которою Земля притягивается этим телом, равен весу самого этого тела на Земле, этот же вес пропорционален массе тела, следовательно, и та сила, с которою каждое отдельное тело притягивает Землю, иначе — абсолютная притягательная сила тела, пропорциональна его массе.

Отсюда следует, что притягательная сила всего тела происходит и слагается из притягательных сил его частиц, и когда увеличивается или уменьшается количество вещества, то в той же пропорции надлежит увеличивать или уменьшать и его притягательную способность. Итак, действие Земли должно рассматривать как состоящее из действий отдельных частиц ее, следовательно, и все земные тела взаимно притягиваются с абсолютными силами, пропорциональными массе притягивающего тела».

Котс пошел дальше Ньютона, не желавшего признать тяготение существенным свойством физических тел. «Подобно тому,— писал он,— как нельзя представить себе тело, которое бы не было протяженным, подвижным и непроницаемым, так нельзя себе представить и тело, которое бы не было тяготеющим, то есть тяжелым».

Возражая против обвинения, что всемирное тяготение очень близко к «свойствам», приписываемым телам аристотелианцами, и одновременно делая выпад против картезианцев, Котс писал:

«Я слышу, как некоторые осуждают это заключение и неведомо что бормочут о скрытых свойствах. Они постоянно твердят, что тяготение есть скрытое, сокровенное свойство, скрытым же свойствам не место в философии. На это легко ответить: сокровенны не те причины, коих существование обнаруживается наблюдениями с полнейшей ясностью, а лишь те, самое существование которых неизвестно и ничем не подтверждается.

Следовательно, тяготение не есть скрытая причина движения небесных тел, ибо явления показывают, что эта причина существует на самом деле. Правильнее признать, что к скрытым причинам прибегают те, кто законы этих движений приписывает неведомо каким вихрям некоторой чисто воображаемой материи, совершенно непостижимой чувствами».

Котс подверг резкой критике гипотезу вихрей Декарта. Однако он стал на идеалистическую почву, обвиняя картезианцев в материализме в их воззрениях на природу.

Главнейшим аргументом против картезианцев Котс считал следующий вывод их философии: «Материя, в силу своей собственной необходимости, всегда и везде существовала, она бесконечна и вечна».

Подготовляя под общим руководством епископа Бентли великий труд Ньютона ко второму изданию, Котс использовал этот случай для укрепления позиций воинствующего идеализма и религии. Свое предисловие он заканчивал словами: «Превосходнейшее сочинение Ньютона представляет вернейшую защиту против нападок безбожников, и нигде не найти лучшего оружия против нечестивой шайки, как в этом колчане».

Можно, конечно, удивляться, почему Ньютон не воспрепятствовал искажению его взглядов в предисловии к его собственному труду.

Как физик Ньютон стремился к механистическому объяснению явлений природы. «Вся трудность физики, как будет видно, состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления»,— писал он в предисловии к первому изданию «Математических начал». Это высказывание по смыслу близко к заявлению Декарта: «Дайте мне материю и движение, и я построю мир».

Оба эти исследователя ниспровергали идеалистическую физику Аристотеля. Расхождения между ними заключались в воззрениях на пространство и силу.

С возникновением спора между картезианцами и ньютонианцами интерес к философии усилился.

Несмотря на загадочность природы тяготения как силы, действующей без посредства среды на расстоянии, теория Ньютона постепенно приобретала все большее число сторонников. В конце XVII в. большинство английских ученых были последователями Ньютона, тогда как во Франции картезианцы господствовали до середины XVIII в. Известный французский писатель Вольтер, посетивший Англию в 1727 г., со свойственным ему остроумием охарактеризовал разногласия в мировоззрении англичан и французов того времени: «В Париже Вселенную видят наполненной эфирными вихрями; здесь же в том же мировом пространстве ведут свою игру невидимые силы. В Париже приливы и отливы морей вызываются давлением Луны; в Англии, напротив, моря тяготеют к Луне; так что в то самое время, как парижане ждут от Луны высокого стояния воды, граждане Лондона ждут отлива»[1].

М. В. Ломоносов (1711—1765) по своим физическим воззрениям стоял ближе к Декарту, чем к Ньютону. Он был последовательным материалистом, считавшим, что мир — это движущаяся материя и что движение не может возникнуть самопроизвольно, а только под воздействием движущегося тела. Поэтому Ломоносов не признавал ньютонианского притяжения: «Без импульса тела не могут ни действовать, ни противодействовать. И от чистого притяжения в телах не может происходить ни какого-либо действия, ни противодействия». «Чистого притяжения быть не может, поэтому тяжесть должна производиться толчком, и должна существовать материя, которая побуждает тяжелые тела к центру Земли».

Если бы одно тело притягивало другое и в результате возникало бы движение, то, по мнению Ломоносова, это противоречило бы впервые сформулированному Декартом закону сохранения движения, согласно которому общая сумма количества движения в природе остается постоянной.

Близки к воззрениям Ломоносова и взгляды математика *Леонарда Эйлера* (1707—1783). В «Письмах к немецкой принцессе» — популярной книге по физике — Эйлер настаивал, что «тяжесть есть действие тонкой материи», как думали Декарт и Гюйгенс. «И действительно,— писал Эйлер,— естественней думать, что два значительно удаленных друг от друга тела сближаются при посредстве какого-нибудь вещества, чем предполагать, что они притягиваются внутренними силами без посредства промежуточной среды. По крайней мере только первое мнение согласуется с прочими нашими опытными данными».

[1] Ф. Даннеман, История естествознания, т. II, ОНТИ, 1935, стр. 228.

Мнение же ньютонианцев о действии тяготения на расстоянии без посредствующей среды он сравнивал с влиянием «духов» и в сочинении «Теория движения твердых тел» писал по этому поводу: «В задачи механики не входит решать, могут ли духи влиять на тела и изменять их состояние».

В течение XVIII в. делались неоднократные попытки объяснить силу тяготения действием промежуточной среды. Одна из наиболее удачных гипотез принадлежит физику *Лесажу* (1724—1803). Лесаж предположил, что пространство наполнено тонкой материей, атомы которой несутся с большой скоростью в различных направлениях и производят давление на поверхность встречающихся на пути тел. Если тело изолировано в пространстве, то силы давления, действующие на него со всех сторон, взаимно уравновешиваются. Когда же в пространстве находятся два тела, то часть потока атомов, несущихся по направлению от одного тела к другому, задерживается. Вследствие этого оба тела испытывают избыточное давление в направлении к другому телу. Это давление и заставляет тела сближаться.

Положим, что потоки атомов бомбардируют поверхность Земли и Луны. На обращенное к Луне земное полушарие не попадут атомы, задерживаемые Луной. На обращенное к Земле лунное полушарие не попадут атомы, задерживаемые Землей. В результате Земля и Луна испытают давление в направлении друг к другу, которое будет сближать их.

Лесаж сумел доказать, что при этом справедлив закон всемирного тяготения, а также получают объяснение механические законы сложения скоростей, свободного падения тел и равенства действия противодействию. Однако эта гипотеза была холодно принята физиками и астрономами. Его механистическое объяснение тяготения основывалось на новой гипотезе быстрых потоков атомов, будто бы производящих эффект тяготения, но не проявлявшихся в каких-либо других физических явлениях.

Несмотря на неудачу попыток свести всемирное тяготение к более простым и понятным механическим явлениям, оно принято современной наукой как физический принцип, подтверждение которого математики, физики и астрономы постоянно находят в своих опытах и наблюдениях.

«Принципы-аксиомы физики доказуемы только опытом,— писал С. И. Вавилов,— они могут быть логически и недоказуемыми. Принципы — это обобщенные опытные факты. Правда, в этом по существу произвольном обобщении кроется элемент гипотезы и в самых «принципах» [1].

В настоящее время принцип всемирного тяготения получил в представлении о поле тяготения интерпретацию, позволяющую отказаться от «действия на расстоянии» через пустое пространство.

МЕХАНИКА ЭПОХИ КАПИТАЛИЗМА

19. НОВЫЕ ЗАДАЧИ ТЕХНИКИ И МЕХАНИКИ

Вторая половина XVII в. стала началом бурного развития как механики, так и вообще физики, вызванного развитием техники.

К середине XVI в. в Европе уже было много капиталистических предприятий, на которых еще господствовал ручной труд, но было введено уже разделение труда. Каждый рабочий делал только какой-то определенный вид работы. Эти предприятия получили название «мануфактур» (от латинских слов *манус* — рука и *фактура* — изделие).

При такой организации производства появилась возможность механизации некоторых видов работ. Машина заменила бы многих рабочих, в руках которых инструмент совершал циклические движения (строгание, распиловку и др.). Однако для механизации был необходим удобный двигатель, приводящий в действие рабочие машины.

Наиболее удобным двигателем в то время было водяное колесо, но для его работы нужна была река. Развитие производства требовало универсального двигателя, который работал бы в любом месте. Таким двигателем стала паровая машина.

Путь, приведший к использованию силы пара, был довольно длинным. Еще в 1698 г. англичанин *Севери*

---

[1] С. И. Вавилов, Исаак Ньютон, изд. АН СССР, 1945, стр. 127.

(1650—1715) создал установку, которая с помощью пара поднимала воду с небольшой глубины. Он предназначал ее для откачивания воды из рудников и назвал «другом рудокопа». В действительности «машина» Севери оказалась мало пригодной для этой цели, так как поднимала воду только с небольшой глубины.

Паровые котлы этой установки были замурованы в каменной кладке (рис. 33). Пар из них поступал в верхнюю часть резервуаров *C*, вытесняя воду через клапаны *A* и вертикальную трубу *B*. Затем поступление пара прекращалось и резервуары *C* охлаждались холодной водой. При этом пар конденсировался, давление резко уменьшалось и из бассейна в шахте по трубе *E* через всасывающие клапаны *D* поступала вода.

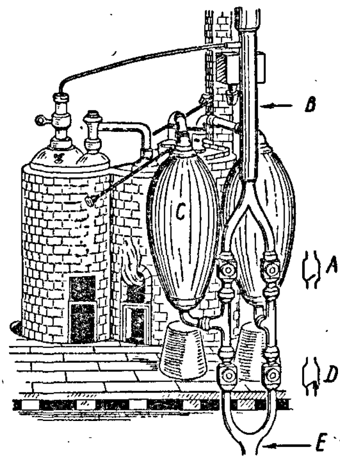

Рис. 33. Машина Севери.

После этого в резервуары вновь впускался пар, вытесняющий из них воду через клапаны *A* в трубу *B*.

Установка Севери была очень неэкономичной, но все-таки она иногда применялась на рудниках. В патенте, выданном изобретателю в Англии, было указано, что цель установки заключается в использовании «движущей силы огня... для приведения в движение мельниц».

Предполагалось, что установка Севери может быть использована для подъема воды, приводящей во вращение водяное колесо. В такой гидропаровой установке (рис. 34) пар поступал из котла *A* через вентиль *B* в резервуар *C*, вытесняя воду через клапан *D* в лоток *F*. Затем вентиль *B* закрывался, а резервуар *C* охлаждался холодной водой из бака *K*. Под давлением атмосферы вода поднималась из бассейна *M* по трубе *N* через клапан *E* в резервуар *C*. Тогда открывали вентиль *B* и пар вновь вытеснял воду из резервуара *C* в лоток *F*, откуда она лилась на водяное колесо *L*.

Эта установка, неуклюжая с точки зрения современной техники, давала возможность пользоваться везде водяным колесом, которое до 80-х годов оставалось единственным широко распространенным двигателем.

В начале XVIII в. английский кузнец *Ньюкомен* (1663—1729) изобрел машину для откачивания воды из шахт (рис. 35). В этой машине рабочей частью служил вертикальный цилиндр с поршнем *B*. Нижняя часть цилиндра была соединена с паровым котлом *C*, в котором давление пара могло не превышать атмосферного. Поршень был подвешен на цепи к коромыслу-балансиру *A*. На другом конце балансира висела штанга *E* рудничного насоса, установленного в шахте.

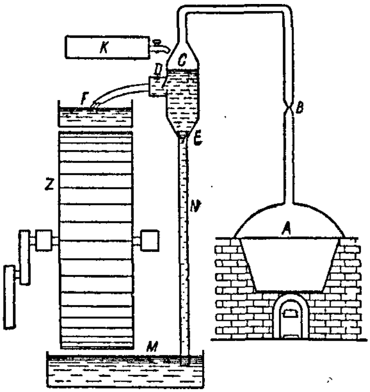

Рис. 34. Гидропаровая установка Севери.

Поршень поднимался под действием силы тяжести насосной штанги, опускающейся в шахту. В это время цилиндр был соединен с котлом и в него поступал пар. Когда поршень достигал крайнего верхнего положения, впуск пара прекращался, а в цилиндр из бака *F* через кран *D* впрыскивалась холодная вода. Пар конденсировался и в цилиндре образовывалось разреженное пространство. Под действием атмосферного давления поршень опускался, а насосная штанга на другом конце балансира поднималась. При этом движении штанги и производилось откачивание воды из шахты. Таким образом, работа совершалась под действием давления атмосферы, а пар играл вспомогательную роль.

Такая установка помещалась в специальном высоком здании, под крышей которого находился балансир, а в нижнем этаже—паровой котел. Конец балансира находился над шахтой и с него спускалась цепь, с подвешенной к ней насосной штангой.

Машина Ньюкомена представляла собой насосную установку и не могла служить двигателем для приведения в действие станков и других рабочих машин.

Универсальный двигатель, пригодный для механизации производственных процессов, был изобретен русским техником *И. И. Ползуновым* (1728—1766), а несколько позднее — англичанином Джемсом Уаттом.

И. И. Ползунов родился в Екатеринбурге (ныне Свердловск) в семье солдата горной роты. Отцу удалось поместить мальчика в Екатеринбургскую горную школу, хотя туда принимали обычно только детей чиновников и дворян. Будущий изобретатель оказался очень способным к учению. Он успешно прошел курс арифметики, геометрии и тригонометрии, научился пользоваться логарифмическими таблицами, овладел искусством черчения.

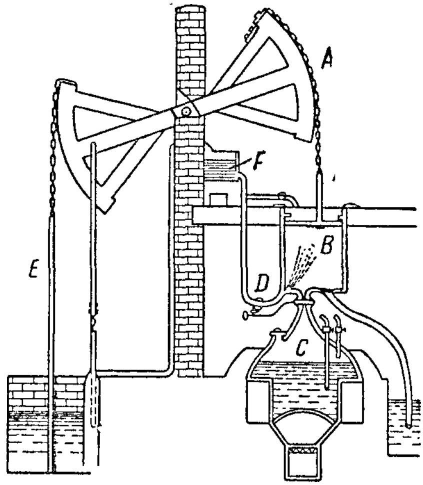

Рис. 35. Машина Ньюкомена.

В возрасте двенадцати лет Ползунов уже начал работать на Екатеринбургском горном заводе, а через пять лет был переведен в канцелярию медеплавильного завода в Барнауле.

В 1758 г. его отправили с обозом, который вез серебро с завода в Петербург. Эту поездку любознательный Ползунов использовал для пополнения своих знаний. В Петербурге он посещал библиотеку Академии наук, бывал на верфях и заводах.

Когда он возвратился в Барнаул, то был произведен в шихтмейстеры,— это было звание, которое давалось техникам казенных заводов.

Познакомившись с описанием машины Ньюкомена, И. И. Ползунов понял ее недостатки и задумал создать действительно универсальный паровой двигатель. В 1763 г. он уже закончил проект «огневого» двигателя и представил его на рассмотрение начальству Барнаульского завода.

В его проекте машина снабжалась двумя цилиндрами. Опускание поршня происходило под действием давления атмосферы, как и в машине Ньюкомена. Поршни подвешивались к концам цепи, переброшенной через шкив. При опускании одного из них другой поднимался, и наоборот. При этом вал, на котором насажен шкив, поворачивался то в одну, то в другую сторону. От вала движение при помощи цепей передавалось зубчатым шестерням, которые открывали и закрывали краны, через которые впускались в цилиндры пар или охлаждающая вода. Когда один из цилиндров сообщался с паровым котлом, в другой впускалась вода.

В отличие от машины Ньюкомена, двигатель Ползунова сообщал валу рабочее (колебательное) движение непрерывно. Это колебательное движение могло быть преобразовано во вращательное движение другого вала при помощи кривошипного механизма, подобно тому как возвратно-поступательное движение штока преобразуется во вращение колес паровоза. Рабочий же вал, вращаясь, мог приводить в движение станки и другие производственные механизмы.

Машина Ползунова (рис. 36) была пущена вскоре после смерти ее изобретателя. Она действовала исправно, приводя в движение меха нескольких заводских печей. Но, как в начале работы любой новой машины, она требовала некоторых исправлений и ремонта. Дирекция Барнаульского завода не желала заниматься этим, машина была остановлена и со временем забыта.

Приблизительно в это же время в Англии над усовершенствованием машины Ньюкомена работал *Джемс Уатт* (1736—1819). Он служил механиком в университете города Глазго. Один из профессоров дал ему для исправления модель машины Ньюкомена. Познакомившись с устройством этой машины, Уатт стал размышлять над созданием более совершенного парового двигателя.

Он поставил перед собой задачу — сделать машину возможно более экономичной. С этой целью он решил производить конденсацию пара не в цилиндре, а в особом резервуаре, оставляя цилиндр паровой машины всегда в горячем состоянии. Затем он предложил прекращать впуск пара в цилиндр ранее, чем поршень доходил до конца своего пути. Движение поршня продолжалось под действием давления расширяющегося пара, расход которого при этом уменьшался.

Наконец, Уатт снабдил машину распределительным устройством, которое производило впуск пара то в одну, то в другую половину цилиндра. Оба движения поршня (прямое и возвратное) стали рабочими. Такая машина

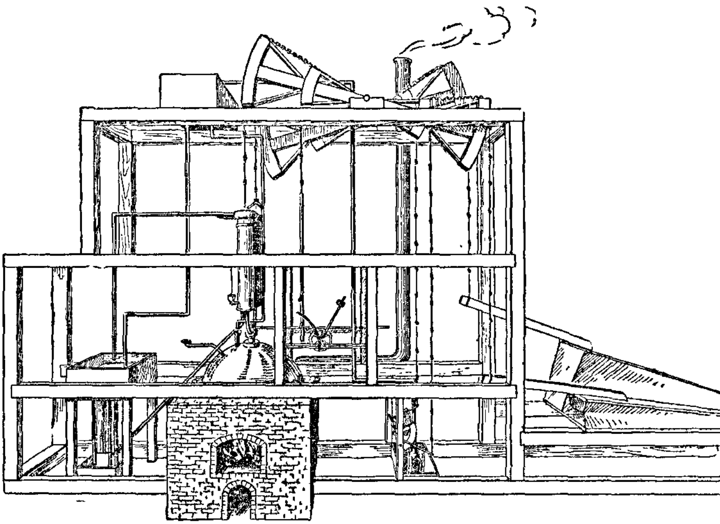

Рис. 36. Машина Ползунова.

двойного действия была уже удобным универсальным двигателем, который можно было применять не только для механизации производства, но и для нужд транспорта.

Первую паровую повозку построил еще в 1770 г. французский инженер *Кюньо* (1725—1804) для передвижения пушек. Однако ее испытание оказалось неудачным: повозка плохо поддавалась управлению и разрушила ограду во дворе арсенала, где происходило ее испытание. Она была сохранена лишь как память о попытке подчинить силу пара человеку.

В конце XVIII в. жители большого американского города Филадельфии с любопытством наблюдали, как по улицам среди повозок с запряженными в них лошадьми двигался экипаж с установленной на нем паровой машиной.

Эта паровая повозка была построена *Оливером Ивансом* (1755—1819). Она была легко управляемой и могла лавировать в лабиринте городских улиц. Но и она не получила применения: по-видимому, для городов такие машины казались слишком громоздкими.

Бо́льший успех обещали паровые повозки английских изобретателей, предложенные для переездов между населенными пунктами. Но оказалось, что на грунтовой дороге колеса повозок глубоко врезались в почву, так как для движения были нужны слишком мощные машины, работа которых сопровождалась сильными толчками. Тогда-то и появилась мысль поставить паровую повозку на рельсы.

В 1813 г. инженер *Блакетт* решил сделать опыт, поставив локомотив на гладкие рельсы. И, к удивлению многих его современников, локомотив двигался по ним относительно быстро.

С опытами Блакетта познакомился молодой машинист *Джордж Стефенсон* (1781—1848). Сын рабочего угольной копи близ Ньюкастля, Стефенсон не получил образования в школе. С семнадцати лет он уже работал как машинист-практик и только тогда выучился грамоте в вечерней школе. Через несколько лет за удачные приспособления, позволившие откачать воду из новой угольной копи, Стефенсон стал старшим машинистом. Он тщательно изучил паровую машину Уатта и после опытов Блакетта занялся созданием локомотива собственной конструкции.

Первый локомотив Стефенсона состоял из цилиндрического парового котла с топкой и трубой для создания тяги. На верху котла были помещены вертикальные цилиндры. От штоков шли тяги к спицам колес, приводившие в движение локомотив. Поршни были поставлены так, что они помогали друг другу проходить через мертвые точки. Обе пары колес были ведущими, причем заднее колесо соединялось при помощи штанги с передним.

Этот локомотив уже приводил в движение поезда на железной дороге между двумя городами Англии. Стефенсон усовершенствовал его. В 1829 г. он построил локомотив, названный им «Ракетой».

«Ракета» имела только одну пару ведущих колес, приводимых в движение двумя наклонно поставленными цилиндрами, расположенными по сторонам котла. Шток поршня передавал движение колесу при помощи шатуна, соединенного кривошипом с его спицами. Кривошипы были поставлены под прямым углом, чтобы избежать мертвых точек. На конкурсе в 1829 г. по быстроте хода и прочности «Ракета» превзошла все другие машины. Локомотив Стефенсона стал исходным образцом, по которому строились и другие локомотивы на рельсовых дорогах.

Развитие машиностроения поставило новые задачи перед механиками — изучение движения свободного твердого тела и условий равновесия и законов движения системы тел. Механика системы тел была призвана решить и проблему формы планет, рассматриваемых как системы материальных точек, связанных силами сцепления.

Характеризуя связь развития теоретической механики с машиностроением, К. Маркс писал: «Очень важную роль сыграло спорадическое применение машин в XVII столетии, так как оно дало великим математикам того времени практические опорные пункты и стимулы для создания современной механики» [1].

20. ДИНАМИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Исходя из установленных Ньютоном основных понятий и законов механики, математики XVIII в. искали методы определения движения материальной точки под действием не только центральных, но и любых ускоряющих сил. В дальнейшем они стремились распространить свои выводы на систему материальных точек и, наконец, на свободное твердое тело. При таком усложнении проблемы применявшиеся Галилеем, Гюйгенсом и Ньютоном геометрические построения, на основе которых ими делались определенные механические выводы, были оставлены. Математики и механики обратились к вычислительному методу, получившему название аналитического. Основоположником этого нового направления был *Леонард Эйлер* (1707—1783).

---

[1] К. Маркс, Капитал, т. I, Госполитиздат, 1955, стр. 356.

Сын пастора в Базеле, Эйлер готовился также к духовному званию, но уроки у замечательного математика того времени *Иоганна Бернулли* (1667—1748) и знакомство с его сыновьями Даниилом и Николаем Бернулли привлекли его к занятиям математикой. Когда братья Бернулли были приглашены в основанную по мысли Петра I в 1725 г. Петербургскую академию наук, они посоветовали вызвать в Петербург и Эйлера.

Эйлер согласился приехать в Россию. В день прибытия его в Петербург скончалась императрица Екатерина I, покровительствовавшая Академии наук. В связи с этим некоторые академики уехали из России, и кафедры физики и математики оказались свободными.

Заняв в Академии 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.

Работы Эйлера, изданные Петербургской академией наук, доставили ему большую известность. Прусский король Фридрих Великий пригласил его в 1741 г. в Берлинскую академию наук. Эйлер принял предложение и переехал в Берлин, где прожил 25 лет.

В этот второй период своей жизни Эйлер издал больше сотни ценных математических трудов и работ по механике. В 1766 г. он по приглашению императрицы Екатерины II снова возвратился в Россию и оставался в Петербурге до конца своей жизни.

В первый же год по возвращении в Россию Эйлер потерял зрение и вторым глазом; он мог различать лишь крупные меловые знаки на черной доске. Однако масштаб его научной деятельности не уменьшился. Он продолжал выпускать математические труды, работая до последнего дня жизни.

Механику материальной точки Эйлер разработал в большом труде «Механика, то есть наука о движении, изложенная аналитическим методом», вышедшем в свет в 1736 г. в Петербурге. Это сочинение заключало в себе динамику как свободной материальной точки, так и движущейся в сопротивляющейся среде. В нем было исследовано движение материальной точки под действием ускоряющих сил.

В определении понятий массы и силы Эйлер следовал за Ньютоном. Силу Эйлер определял как «усилие, которое переводит тело из состояния покоя в состояние движения или видоизменяет его движение». Однако он ставил вопрос и о природе сил, возвращаясь к воззрению Декарта и не признавая возможности взаимодействия тел на расстоянии без участия промежуточной среды. Принцип инерции по Эйлеру — абсолютный закон; тело, находящееся в состоянии относительного покоя, получает, по его мнению, ускорение вместе с ускорением системы отсчета.

В период научной деятельности Эйлера исчисление бесконечно малых, разработанное Ньютоном (метод флюксий) и *Готфридом Лейбницем* (1646—1716), получило развитие в трудах французских математиков. Оно давало возможность сравнительно легкого и вместе с тем глубокого исследования задач механики. Эйлер в своих трудах применял анализ бесконечно малых, отказавшись от геометрического метода, о котором писал: «...хотя читатель и убеждается в истине выставленных (т. е. выведенных геометрическим методом.— *Б.* и *М.*) предложений, но он не получает достаточно точного и ясного их понимания, так что, если чуть-чуть изменить те самые вопросы, он едва ли будет в состоянии решить их самостоятельно, если не прибегнет сам к анализу и те же предложения не разрешит аналитическим методом» [1].

Ускоряющую силу Эйлер разлагал по трем взаимно перпендикулярным направлениям: по касательной (тангенциальная составляющая), по главной нормали и по бинормали к траектории. Разработав аналитический метод исследования движения материальной точки, Эйлер мог уже в самом общем виде определять по заданным силам траекторию точки или по движению точки — действующую на нее силу.

Когда шотландский математик *Маклорен* (1698—1746) ввел в механику неподвижные (декартовы) координаты, Эйлер правильно оценил преимущество метода

[1] Л. Эйлер, Механика, то есть наука о движении, изложенная аналитическим методом, ОНТИ, 1938, стр. 33—34.

исследования, основанного на их применении, и в своем сочинении «Теория движения твердых тел», вышедшем в свет в 1765 г., воспользовался этим методом.

Эйлером была разрешена проблема вращательного движения тел.

В общем виде движение свободного твердого тела можно представить как одновременно происходящее прямолинейное поступательное движение его центра тяжести и вращение тела около некоторой оси вращения. Такое движение возникает, например, как показали в 1737 г. Эйлер и Даниил Бернулли, при косом ударе, т. е. ударе, направленном мимо центра тяжести тела. В этом случае центр тяжести тела движется так, как если бы удар был направлен прямо на него. Кроме того, возникает вращение относительно центра тяжести, которое происходит так же, как будто он остался неподвижным. К поступательному движению центра тяжести свободного твердого тела могли быть применены законы движения свободной материальной точки, но вращение твердого тела потребовало нового глубокого исследования.

Эйлер доказал, что любое перемещение твердого тела около его неподвижного центра тяжести можно осуществить поворотом около проходящей через него оси. Эта ось, постоянно изменяющая свое положение в теле (проходя, однако, при всех положениях тела через центр его тяжести), получила название мгновенной. Но, как доказал Эйлер, в каждом теле существуют три оси, вокруг которых свободное тело может вращаться, не изменяя само по себе их положения в пространстве. Они получили название главных, или свободных, осей вращения. Однако только одна из них обладает тем свойством, что вращение вокруг нее устойчиво: если вращающееся тело под влиянием внешних сил изменит ось вращения, то эта новая ось вращения стремится приблизиться к главной оси, описывая вокруг нее коническую поверхность. Вращение же вокруг одной из двух других главных осей неустойчиво; при малейшем воздействии не параллельных им внешних сил тело меняет ось вращения, которая постепенно все более удаляется от главной оси.

Описанные свойства вращающегося твердого тела Эйлер объяснил, введя в механику понятие о моменте инерции (сумма произведений масс частиц тела на квадраты их расстояний от оси вращения). Эта величина в уравнениях вращения твердого тела играет роль, аналогичную роли массы в уравнениях поступательного движения. Вращение устойчиво вокруг той из главных осей, относительно которой момент инерции тела имеет наибольшую величину.

Основной закон динамики для вращения твердого тела вокруг оси $M = I\frac{d\omega}{dt}$ (где M — момент силы, I — момент инерции, $\frac{d\omega}{dt}$ — угловое ускорение) оказался вполне аналогичным второму закону Ньютона, причем силе соответствовал момент силы, массе — момент инерции, а ускорению — угловое ускорение. Из формулы следует, что если на вращающееся тело не действуют внешние силы, то его угловая скорость ω — постоянная величина, т. е. этот случай соответствует равномерному поступательному движению по инерции. Подобно телу, движущемуся поступательно и имеющему количество движения mv, вращающееся тело обладает моментом количества движения $I\omega$, где ω — угловая скорость, I — момент инерции вращающегося тела.

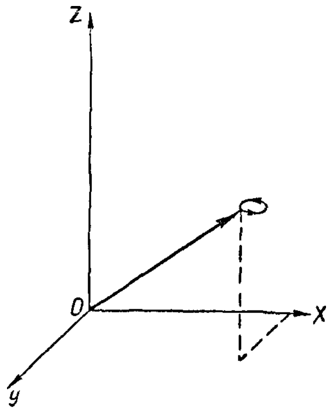

Рис. 37. Кривая, описываемая полюсом вектора момента количества движения.

Изобразим момент количества движения вращающегося тела вектором, проведенным из начала прямоугольных координат (рис. 37). При вращении тела под действием внешних сил этот вектор меняет положение в пространстве, вследствие чего его конец, называемый обыкновенно полюсом, описывает кривую.

Можно показать, что слагающие скорости движения полюса по направлению координатных осей геометрически тождественны с проекциями на них суммы моментов внешних сил. Поэтому скорость полюса для каждого мгновения равна по величине и совпадает по направлению с полным моментом внешних сил. Следовательно, по изменению момента внешних сил относительно оси вращения тела можно указать, как движется полюс, и наоборот. Сравнивая движение полюса с движением материальной точки, увидим, что первое зависит от момента сил, а второе — от действующих на точку самих сил. Величина момента определяет скорость движения полюса, а силы, действующие на материальную точку,— ее ускорение.

Если действие сил на материальную точку прекращается, то она продолжает двигаться равномерно по инерции. Если же момент внешних сил относительно оси вращения становится равным нулю, то движение полюса прекращается, т. е. он не обладает инерцией. Кажущаяся парадоксальность движения полюса без инерции объясняется тем, что он не материальная точка, обладающая массой, а лишь отвлеченное геометрическое понятие.

Этот вывод, сделанный английским математиком *Гейуордом,* а позднее самостоятельно *Резалем* (1828—1896), с успехом прилагается к объяснению прецессии земной оси.

Земля представляет собой (с известной степенью точности) эллипсоид вращения. Ее можно представить себе в виде шара, опоясанного по экватору толстым обручем. Притяжение Луной и Солнцем частиц этого шара не может повлиять на положение оси вращения Земли в пространстве, так как равнодействующая сил притяжения проходит через его центр. Силы же притяжения экваториального кольца стремятся повернуть его в плоскость лунной и солнечной орбит, потому что ближайшая к Луне и Солнцу часть кольца притягивается с большей силой, чем более удаленная от нее. Под действием сил притяжения Луны и Солнца земная ось описывает в пространстве поверхность конуса с вершиной в центре Земли, причем она сохраняет постоянный наклон к плоскости земной орбиты. Период этого движения — 25 700 лет. За это время полюс мира описывает окружность на небесной сфере вокруг точки пересечения с небесной сферой перпендикуляра к плоскости земной орбиты.

Как Солнце, так и Луна меняют свое положение относительно экватора. Поэтому величина момента пары сил, действующих на экваториальное утолщение Земли, постепенно меняется. Узлы лунной орбиты медленно движутся по эклиптике навстречу движению Луны, совершая полный оборот в $18^1/_2$ лет. Поэтому положение вектора момента пары сил лунного притяжения меняется в пространстве с тем же периодом в $18^1/_2$ лет, что по теореме Гейуорда-Резаля должно отразиться и на прецессионном движении земной оси. Вследствие этого полюс мира движется не точно по кругу, а немного отклоняется то в одну, то в другую сторону. Период отклонений — $18^1/_2$ лет. Это явление называется вынужденной нутацией.

Рассматривая движение твердого тела, имеющего одну неподвижную точку, Эйлер установил, что действие на него внешних сил может быть сведено к действию силы, приложенной в этой точке и к действию пары сил. Линейный момент этой пары он спроектировал на прямоугольные оси координат и вывел свои известные уравнения [1], связывающие эти проекции с моментами инерции относительно главных осей вращающегося тела и с проекциями на них угловой скорости и углового ускорения тела. Из этих уравнений Эйлер теоретически вывел, принимая Землю за абсолютно твердое тело, что мгновенная ось вращения Земли должна совершать равномерное движение по конической поверхности вокруг полярной оси с периодом 305 дней. Причина этого явления — постоянное перемещение масс на земной поверхности, вследствие чего изменяется положение оси наибольшего момента инерции земного шара.

Вывод Эйлера впоследствии подтвердился, но так как Земля не абсолютно твердое тело, период обращения оказался равным 428 дням.

Из основного закона вращательного движения следовало, что если на вращающееся тело не действуют внешние силы, не параллельные оси вращения, то момент количества движения тела не изменяется. Поэтому если во вращающейся замкнутой системе увеличивается или

---

[1] Уравнения Эйлера:

$$M_x = A\frac{dp}{dt} + rq\,(C - B),\quad M_y = B\frac{dq}{dt} + rp\,(A - C),$$

$$M_z = C\frac{dr}{dt} + qp\,(B - A),$$

где A, B, C — моменты инерции относительно главных осей, p, q, r — проекции угловой скорости на оси координат.

уменьшается момент инерции, то соответственно уменьшается или увеличивается угловая скорость.

Постоянство момента количества движения вращающегося тела можно иллюстрировать опытом со «скамейкой Жуковского».

Человек с гирями в отведенных в стороны руках стоит на равномерно вращающейся скамейке. Но стоит человеку опустить руки с гирями, как скорость вращения скамейки увеличивается. Явление объясняется тем, что при опускании рук с гирями момент инерции всей системы уменьшается, а так как величина момента количества движения сохраняется неизменной, то увеличивается угловая скорость.

Пусть теперь человек стоит на покоящейся, но могущей вращаться скамейке и держит в руках тяжелое колесо на вертикальной оси. Момент количества движения системы равен нулю. Если человек приведет во вращение колесо, то скамеечка начнет вращаться в обратную сторону. Этот опыт также подтверждает закон сохранения момента количества движения, так как сила, приведшая в движение колесо, является внутренней силой системы и она не может изменить ее момента количества движения. Скамейка будет вращаться с такой угловой скоростью, что сумма моментов количества движения скамейки с человеком и колеса (моменты имеют разные знаки, потому что скорости движения имеют противоположные направления) будет равна нулю.

Законы вращения тел, на которые действуют внешние силы, были изучены на опытах с массивными симметричными телами, вращающимися с большой скоростью. Эти тела называются волчками или гироскопами. Первый из них был сконструирован еще в 1817 г. *Боненбергером* (1765—1831). Он состоял из массивного диска, вращавшегося в двух подвижных кольцах, подвешенных по способу Кардана (рис. 38). Позднее были построены гироскопы и иной конструкции. Во всех этих приборах влияние силы тяжести на вращение диска устранено, и движение его происходит по инерции.

Когда диск гироскопа приведен в быстрое движение, то при любом изменении положения прибора ось вращения сохраняет свое направление в пространстве. Это явление объясняется инерцией частиц гироскопа. При действии на гироскоп внешних сил инерция движения его частиц проявляется в том, что гироскоп «сопротивляется» изменению направления его оси вращения. Это сопротивление ощущается при опытах как сила, поворачивающая ось вращения гироскопа.

Простейший опыт, позволяющий познакомиться с этим явлением,— вращение велосипедного колеса, взятого за концы оси руками. Если поворачивать ось вращающегося колеса в горизонтальной плоскости, то руки испытывают давление в вертикальном направлении. Наоборот, при поворачивании оси в вертикальной плоскости силы давления действуют в горизонтальном направлении. Рассматривая относительное направление сил, меняющих положение оси вращения и сил сопротивления этому изменению, можно вывести такое правило: когда на ось вращающегося волчка действует отклоняющая сила, то возникает движение оси в направлении, перпендикулярном этой силе.

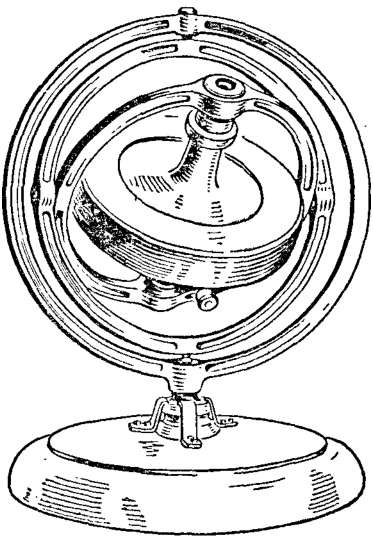

Рис. 38. Гироскоп на кардановом подвесе.

Описанное явление удобно наблюдать на так называемом рычажном гироскопе (рис. 39). Этот прибор состоит из массивного металлического диска C, который может вращаться около оси, лежащей на продолжении стержня B. Опора A этого стержня устроена так, что он может вращаться в горизонтальной плоскости. По стержню может перемещаться груз P. Когда груз P и диск C уравновешивают друг друга и диск вращается в сторону, указанную стрелкой, то части прибора сохраняют данное им расположение. Если же груз перевешивает и стремится повернуть систему в вертикальной плоскости вниз, то это действие груза оказывается еле заметным — ось совершает небольшие колебания вверх и вниз, но зато весь прибор приобретает вращательное движение в горизонтальной плоскости в направлении, указанном стрелкой R, причем это вращение равномерно.

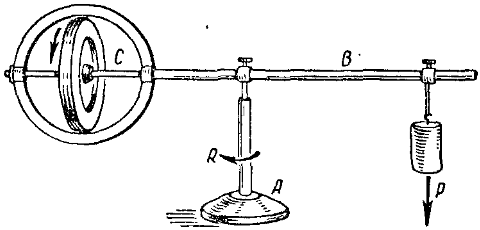

Рис. 39. Рычажный гироскоп Фесселя.

Другой прибор (рис. 40), эффектно демонстрирующий это явление,— массивный диск C, вращающийся в горизонтальном кольце bb, которое опирается плоским

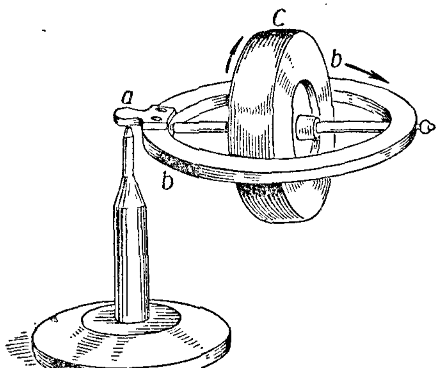

Рис. 40. Гироскоп, опирающийся концом оси на острие.

отростком a на вертикальное острие. Если диск приведен во вращательное движение, то кольцо свободно висит в воздухе, но при этом быстро движется в горизонтальной плоскости.

Если к гироскопу приложена пара сил, поворачивающих его около оси, перпендикулярной к оси вращения гироскопа, то он станет поворачиваться около третьей оси, перпендикулярной к первым двум, стремясь к тому, чтобы его ось вращения образовала возможно меньший угол с осью вынужденного вращения. В соответствии с этим концы оси гироскопа при изменении ее положения в пространстве оказывают давление на подшипники опоры.

21. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ НЕСВОБОДНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Механизм можно рассматривать как несколько твердых тел, взаимодействующих между собой. Это взаимодействие носит название сил связи. Силы связи производят давление на опоры, изгиб, растяжение и скручивание частей механизма. При рассмотрении движения механизма необходимо, кроме внешних сил, принимать во внимание и силы связи. Трудность этой проблемы показана знаменитым французским математиком XVIII в. Жозефом Лагранжем в словах: «В том случае, когда исследуют движения многих тел, действующих друг на друга путем удара или давления, будь то непосредственно, как при обычном ударе, или же при посредстве нитей или несгибаемых рычагов, к которым они прикреплены, или же вообще каким-либо иным образом, то этого рода задача принадлежит к проблемам более высокого порядка, которая не может быть разрешена с помощью приведенных выше положений (законов движения свободных тел.— *Б.* и *М.*). Дело в том, что в этом случае силы, действующие на тело, неизвестны и их следует определить на основании действия, которое тела должны оказывать одно на другое в соответствии с их взаимным положением» [1].

Определение сил, действующих на связи, представляло нелегкую задачу, разрешавшуюся в каждом отдельном случае Эйлером, Иоганном и Даниилом Бернулли и другими механиками и математиками в качестве самостоятельной проблемы. По словам Лагранжа, «требовалась всегда особая ловкость для определения всех сил, которые в данном случае должны быть приняты во внимание»[2].

---

[1] Ж. Лагранж, Аналитическая механика, т. I, Гостехтеоретиздат, 1950, стр. 299.

[2] Там же, стр. 311.

Решения таких задач даны в сочинениях Эйлера, Клеро, братьев Бернулли и других математиков XVIII в. Определив каким-либо способом силы, действующие между частями механизмов, можно было уже пользоваться законами движения свободных тел, не принимая во внимание связи.

Этот способ не был пригоден для разрешения проблемы движения системы связанных тел в общем виде. В поисках метода, применимого для описания движения системы тел, механики использовали закон сохранения кинетической энергии (в том виде, в каком он был тогда известен).

Еще Гюйгенс, изучая движение физического маятника, принял постулат: «Если любое число весомых тел приходит в движение благодаря их тяжести, то общий центр тяжести этих тел не может подняться выше, чем он был в начале движения»[1]. Это положение уже заключало принцип сохранения кинетической энергии в применении к движению системы тел в поле силы тяжести. Пользуясь этим постулатом, Гюйгенс сумел решить проблему физического маятника, определив длину математического маятника, который колеблется изохронно с данным физическим маятником.

В дальнейшем немецкий математик и философ Готфрид Лейбниц ввел в механику понятие о «живой силе» — произведении массы тела на квадрат его скорости, т. е. понятие о кинетической энергии тела. Принимая принцип сохранения «живой силы» в изолированной системе тел, можно было решить ряд задач динамики системы. Наконец, некоторые механики, изучая динамику системы связанных тел, хотели свести уравнения, описывающие движение системы, к уравнениям, выражающим условия равновесия.

Изучая движение физического маятника, математик *Яков Бернулли* (1654—1705)[2] сделал предположение, что его можно рассматривать как две материальные точки, подвешенные на прямой несгибающейся нити, и установил, что вследствие существующей между ними

---

[1] Х. Гюйгенс, Три мемуара по механике, изд. АН СССР, 1951, стр. 122.

[2] Из фамилии Бернулли вышло много математиков. Первыми из них были братья Яков и Иоганн (1667—1748). Некоторые математики, жившие позднее, носили те же имена.

связи скорость верхней точки меньше, а нижней — больше той скорости, с которой двигались бы эти точки, если бы были свободными.

«Таким образом, скорость, теряемая первым грузом, передается второму, и так как эта передача происходит при помощи рычага, способного двигаться около неподвижной точки, то она должна следовать закону равновесия сил, приложенных к этому рычагу, так что потеря первого груза в скорости относится к выигрышу второго обратно отношению соответствующих плеч рычага, то есть расстояний от точки подвеса [1].

Это рассуждение было первой попыткой свести задачу динамики к уравнениям статики. Развивая эту идею, французский физик *Лопиталь* (1661—1704) в работе, опубликованной в 1690 г., установил равновесие между количествами движения, потерянными и приобретенными этими грузами.

Наконец, знаменитый французский механик и математик *Жан Даламбер* (1717—1783) дал общий метод сведения задач динамики к уравнениям статики.

Даламбер не знал своих родителей. Ребенком он был найден на паперти одной из церквей в Париже и воспитан в семье стекольщика. Для заработка Даламбер занимался юридическими науками, но увлекшись математикой, проявил в ней большие способности и быстро приобрел известность среди ученых. В возрасте 24 лет Даламбер уже был избран 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 этих предложений и всю жизнь оставался на родине — во Франции, где был избран секретарем Парижской академии наук.

В своем знаменитом трактате по динамике Даламбер предлагал отказаться от понятия силы, рассматривая лишь движения тел. «Динамика» Даламбера начинается установлением основных положений: «Все принципы ме-

---

[1] Ж. Лагранж, Аналитическая механика, т. I, Гостехиздат, 1950, стр. 308.

ханики,— говорил автор,— можно свести к трем, а именно принципу силы инерции, принципу сложения движений и принципу равновесия... Силой инерции я вместе с Ньютоном называю свойство тел сохранять то состояние, в котором они находятся...»[1] Отвергая понятие об ускоряющей силе, которое он считал неясным и потому бесполезным, Даламбер писал, что он будет употреблять слово «сила» лишь для простого обозначения произведения массы движущегося тела на его скорость.

Общая задача, которую ставил Даламбер, такова: «Дана система тел, расположенных друг относительно друга произвольным образом. Каждому из этих тел передается некоторое движение, которое оно, однако, не может воспринять вследствие действия прочих тел... Найти движение каждого из данных тел».

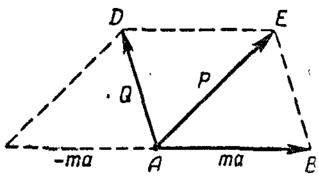

Рис. 41. Применение принципа Даламбера.

Решая эту задачу, Даламбер вывел свой принцип (начало): «Чтобы найти движение нескольких тел, действующих друг на друга, нужно разложить полученные телами движения... на два других движения. Эти составляющие движения должны быть подобраны таким образом, что у каждого тела одно из этих составляющих движений должно уничтожиться, а другое должно быть таким и так направленным, чтобы действие окружающих тел не могло ничего в нем изменить. Отсюда легко видеть, что все законы движения тел могут быть сведены к законам равновесия».

Поясним этот принцип. Положим, что несвободная материальная точка A с массой m (рис. 41) находится под действием силы P, но под влиянием связей она получает ускорение a *не по направлению* AE, *а в направлении* AB.

Поэтому можно считать, что сила P разлагается на две силы: ma и Q, из которых последняя «теряется», не сообщая точке никакого ускорения. Эта «потеря» объясняется уравновешиванием силы Q связями. Сила ma, сообщающая движение точке A, может быть найдена,

[1] Ж. Даламбер, Динамика, Гостехтеоретиздат, 1950.

как сторона параллелограмма, построенного на «потерянной» силе Q, диагональю которого служит P.

Следовательно, для решения задачи о движении точки A под действием силы P нужно найти «потерянную» силу Q, что сводится к нахождению уравновешивающей ее силы связи.

Как известно, определение сил связи большей частью затруднительно. Можно, однако, исключить их из уравнений движения, введя понятие о *фиктивных* инерционных силах.

Приложим мысленно в точке A направленную влево силу $-ma$, уравновешивающую силу, направленную вправо. Очевидно, что «потерянная» сила Q есть равнодействующая сила $-ma$ и P. Поэтому, приложив мысленно к точке A силу $-ma$, мы можем вместо условий равновесия «потерянных» сил изучать равновесие внешней силы и силы $-ma$.

Сила $-ma$ по величине равна, а по направлению противоположна силе ma, сообщающей движение точке A, т. е. она представляет собой силу инерции, но приложенную не к связям, а к ускоряемой точке A. Таких сил в природе не существует, сила $-ma$ фиктивна, т. е. имеет лишь математический смысл.

Приведем простой пример применения принципа Даламбера к движению твердого тела, принятого за материальную точку. Предположим, что в каюте судна лежит тело с массой m, которое может скользить без трения по полу. Тело соединено резиновым шнуром с передней стеной каюты.

Когда судно начнет двигаться с постоянным ускорением a, тело на скользком полу получит движение относительно передней стены каюты в обратную сторону, которое прекратится как только натяжение резины сообщит телу ускорение a, т. е. будет тянуть его за судном. Одновременно тело будет оказывать инерционное противодействие, равное $-ma$ и приложенное через резиновый шнур к судну.

Движение тела относительно берега выражается уравнением $f = ma$, где f — сила натяжения резины. Относительно стен каюты тело находится в покое, что можно объяснить действием на тело силы $-ma$, уравновешивающей натяжение резины. Равновесие относительно каюты выразится уравнением $f + (-ma) = 0$ или $f - ma = 0$.

Полученное выше уравнение движения $f = ma$ можно также написать в виде $f - ma = 0$. Следовательно, его можно считать формальным условием равновесия между реальной внешней силой и силой инерции, считая силу инерции приложенной к самому телу.

Пользуясь этим принципом, Даламбер разрешал труднейшие задачи динамики системы связанных твердых тел.

Дальнейшее развитие динамики было связано с работами французского математика Жозефа Лагранжа.

Жозеф Лагранж (1736—1813) был сыном бедных родителей и с ранних лет должен был сам добывать средства к жизни. В возрасте 19 лет он уже преподавал математику в артиллерийском училище, где некоторые из его учеников были старше своего учителя.

В 1764 г. Лагранж получил большую известность, представив в Парижскую академию наук исследование либрации Луны, удостоенное специальной премии. Через два года после этого он был приглашен Берлинской академией занять место Эйлера, уехавшего в Россию.

В Берлине Лагранж прожил двадцать лет и издал много трудов по математике и механике. Там же он написал знаменитую «Аналитическую механику» (1788), положив в ее основу принцип возможных перемещений.

Считая принцип возможных перемещений не очевидным, Лагранж доказывал его справедливость, прибегая к рассмотрению равновесия системы подвижных и неподвижных блоков. Сначала он рассматривал равновесие груза, подвешенного к подвижному блоку.

Если на подвижном полиспасте (Лагранж называл полиспастом несколько блоков — подвижных или неподвижных — в одной обойме) подвешен груз, то к концу веревки, обвивающей подвижные и неподвижные блоки, для уравновешивания груза нужно приложить силу, которая относится к весу груза, как единица к числу витков веревки. («витки» — части веревки между подвижными и неподвижными блоками; например, при одном подвижном блоке — два витка, при двух подвижных блоках — четыре витка и т. д.—*Б.* и *М.*). Следовательно, на обойму подвижных блоков действует сила, направленная против силы тяжести, превосходящая приложенную к свободному концу веревки силу во столько раз, сколько имеется витков.

Положим, что веревка огибает блоки нескольких полиспастов первого рода a_1, a_2, a_3 (рис. 42) с различным числом подвижных и неподвижных блоков в каждом из них (на рисунке 42 система подвижных или неподвижных блоков в одной обойме изображена условно одним кружком). Причем связи этой системы идеальны, т. е. не препятствуют возможным перемещениям; веревка нера-

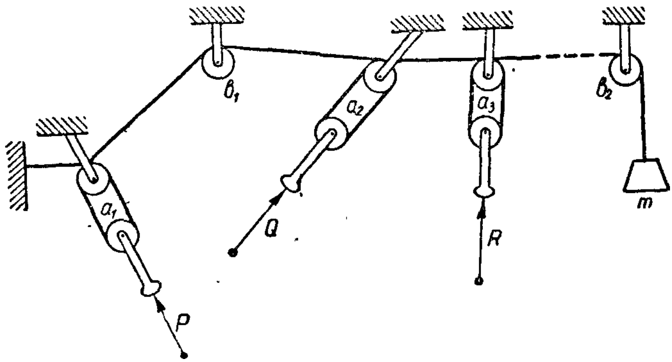

Рис. 42. Доказательство принципа возможных перемещений, данное Лагранжем.

стяжима и витки ее параллельны между собой, подвижные блоки невесомы. Один конец веревки закреплен неподвижно, к свободному же концу ее приложена некоторая сила.

Переходя к рассмотрению этой системы полиспастов, Лагранж писал: «Если увеличить число неподвижных и подвижных полиспастов и охватить их все одной и той же веревкой, пользуясь при этом различными неподвижными блоками для изменения направления веревки, то та же сила, приложенная к подвижному концу веревки, будет в состоянии поддержать столько грузов, сколько имеется подвижных полиспастов, и каждый из этих грузов будет относиться к данной силе, как число витков полиспаста относится к единице»[1].

[1] Ж. Лагранж, Аналитическая механика, т. I, Гостехиздат, 1950, стр. 44.

Далее Лагранж заменяет силу грузом m, принимаемым за единицу, а подвижные полиспасты освобождает от поддерживаемых ими грузов и прикрепляет к материальным точкам. На эти точки будут действовать силы, пропорциональные числу витков веревки, обвивающей соответствующий подвижный полиспаст (по направлению этих витков). Обозначим их через P, Q, R.

«...Для сохранения равновесия этой системы, подверженной действию различных сил, необходимо, чтобы при любом бесконечном малом перемещении точек системы груз не опускался. В самом деле, груз всегда стремится опускаться, поэтому, если существует такое перемещение системы, которое позволяет ему опуститься, он необходимо опустится и вызовет это перемещение системы»[1].

Пусть $\alpha, \beta, \gamma\ldots$— бесконечно малые отрезки пути, которые прошли бы точки системы по направлению действующих на них сил. Тогда обоймы подвижных блоков приблизились бы (или удалились) к неподвижным на расстояния α, β, $\gamma\ldots$ и веревка, обвивающая полиспасты, укоротилась бы на $\alpha P + \beta Q + \gamma R + \ldots$, вследствие чего груз снизился бы на такое же расстояние. Чтобы он не опускался, сумма $\alpha P + \beta Q + \gamma R\ldots$ должна быть равна нулю.

Равенство $\alpha P + \beta Q + \gamma R + \ldots = 0$ представляет собой математическое выражение принципа возможных перемещений, которое Лагранж сформулировал в таком виде: «Если какая-либо система любого числа тел или точек, на каждую из которых действуют любые силы, находится в равновесии и если этой системе сообщить любое малое движение, в результате которого каждая точка пройдет бесконечно малый путь, представляющий ее виртуальную скорость, то сумма сил, помноженных каждая соответственно на путь, проходимый по направлению силы точкой, к которой она приложена, будет всегда равна нулю, если малые пути, проходимые в направлении сил, считать положительными, а проходимые в противоположном направлении считать отрицательными».

Исходя из начала возможных перемещений, Лагранж математически вывел в «Аналитической механике» законы статики и динамики. Этот труд был торжеством аналитического метода в механике, и с появлением его геометрический метод был надолго почти совсем оставлен.

---

[1] Ж. Лагранж, Аналитическая механика, т. I, Гостехиздат, 1950, стр. 45.

Произведение силы на путь, пройденный ее точкой приложения, представляет собой работу силы. Следовательно, начало возможных перемещений может быть сформулировано так: необходимое и достаточное условие равновесия системы заключается в том, что сумма работ приложенных к ней сил для каждого возможного перемещения системы равна нулю.

При выводе этого закона связи считались идеальными, т. е. не вызывающими трения или других сопротивлений возможным перемещением. Поэтому, применяя начало возможных перемещений к определению условий равновесия системы тел, силы связи исключают из рассмотрения.

Начало возможных перемещений дает простой способ расчета механизмов. Исходя из характера связей, находят возможное перемещение точки приложения действующей силы и поднимаемого груза. Приравнивая затем сумму работ при возможном перемещении нулю и не учитывая возникающих сил связи, определяют отношение силы к весу груза.

Пользуясь началом возможных перемещений, можно определить и любую силу связи между частями механизма. Для этого мысленно удаляют материальную связь, заменив ее соответствующей силой, которую причисляют к внешним силам. Применив к системе начало возможных перемещений, находят условие равновесия в виде уравнения, в котором все величины, кроме силы связи, известны и из которого эта сила может быть легко определена.

Систему можно рассматривать, как множество материальных точек, соединенных силами связи. Пользуясь началом возможных перемещений, можно составить уравнения равновесия этих точек под действием внешних сил и сил инерции, условно считая эти последние приложенными к самим точкам. Это и будут уравнения движения системы.

В уравнениях равновесия, составленных исходя из начала возможных перемещений, отсутствуют силы связи. Следовательно, их не будет и в уравнениях движения, составленных по методу Даламбера.

«Если мы представим себе,— писал Лагранж,— что каждому телу мы сообщаем в противоположном направлении то движение, которое оно должно получить, то ясно, что система будет приведена в положение покоя; следовательно, эти последние движения должны уничтожить те движения, которые тела получили бы и которые они выполнили бы при отсутствии взаимодействия между ними; таким образом должно существовать равновесие между всеми этими движениями или между силами, которые способны их вызвать...»[1].

Представляя себе, что телу сообщаются движения в направлениях, противоположных действующим силам, Лагранж вводит понятие о фиктивных силах. Эти силы в современной механике получили название фиктивных сил инерции, которые нередко неправильно смешиваются с ньютоновскими силами инерции.

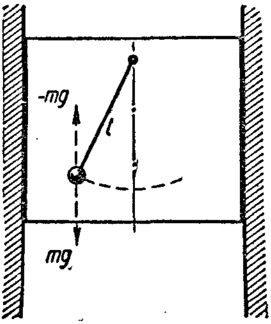

Рис. 43. Применение принципа Даламбера к решению задачи о падающем маятнике.

Применение начала Даламбера в том виде, какой ему придал Лагранж, очень облегчает решение задач динамики.

Положим, например, что на прямоугольной доске, которая может свободно падать вниз между вертикальными рейками, подвешен маятник l (рис. 43). Отклоним маятник в сторону и в этот момент дадим доске возможность падать. Решить вопрос, что произойдет с маятником, значит найти, как будет вести себя маятник относительно доски. Применим начало Даламбера.

На маятник действует сила тяжести mg, направленная вниз. Приложим к нему фиктивную силу инерции $-mg$, которая равна силе тяжести, но направлена в противоположную сторону. Сумма этих двух сил равна нулю. Поэтому маятник в течение всего времени падения останется отклоненным от вертикали на один и тот же угол, как будто он потерял вес.

22. УЧЕТ В ТЕХНИКЕ СИЛ ИНЕРЦИИ

При применении законов динамики в технике встал вопрос о силах, которые возникают в ускоренной системе и действуют на связи. Особенно важное значение имеют

[1] Ж. Лагранж, Аналитическая механика, т. I, Гостехиздат, 1950, стр. 313.

силы, действующие во вращающейся системе, а также при поступательном движении по криволинейному пути.

Шары центробежного регулятора, частицы маховика и других вращающихся частей механизмов находятся под действием центростремительных сил связи. Вследствие этого, как уже было сказано, возникают в соответствии с третьим законом динамики *реальные* силы инерции, которые заметно увеличивают давления на опорные точки и влекут быстрый износ или поломки вращающихся валов, подшипников и т. п.

Расчет маховиков, мостов, по которым проходят с большой скоростью тяжелые поезда, шатунов и валов быстроходных машин потребовал учета этих динамических нагрузок, достигающих иногда очень больших величин.

Введение в механику сил инерции сопровождалось большими разногласиями, находящими отзвук и в наше время. Обсуждался вопрос, существуют ли реально инерционные силы в том смысле, какой придается этому понятию в механике.

Рассматривая вопрос о реальности или иллюзорности сил инерции, академик *В. Л. Кирпичев* (1845—1913) указывал, что инерционные силы вполне реальны и «проявляют свое существование такими же явлениями, как и другие известные нам силы» [1].

Причиной же отрицания реальности этих сил служит неправильное понимание того, к каким телам приложены силы инерции [2].

Например, реальная центробежная сила, возникающая при вращении маховика, приложена к валу через его спицы, которые могут не выдержать напряжения и разорваться. Если бы маховик не был вполне симметричен, то возникли бы неуравновешенные центробежные силы, изгибающие вал. Центробежные силы нередко служат причиной поломок и аварий машин.

Академик В. Л. Кирпичев приводит пример паровоза, у которого при скорости 136 $\frac{км}{час}$ получалась неуравновешенная центробежная сила на оси с ведущими колесами,

---

[1] В. Л. Кирпичев, Беседы о механике, Гостехтеоретиздат, 1950, стр. 111.

[2] По вопросу о реальности или фиктивности сил инерции см. книгу С. Э. Хайкина «Что такое силы инерции», Гостехтеоретиздат, 1939.

доходившая до 5 T. При каждом обороте колеса центр тяжести его описывал окружность и, когда он подходил к нижней точке ее, рельс испытывал действие, подобное резкому удару, повторяющемуся около 340 раз в минуту.

При вращении маховика возникает, кроме того, и касательная инерционная сила, направленная в сторону, обратную касательному ускорению вращающегося тела. Вследствие этого при неравномерном вращении, например при пуске или остановке машины, когда изменяется угловая скорость вращения, в ободе маховика возникают касательные инерционные силы, скручивающие вал. Касательные инерционные силы определяются по формуле $m\frac{d\omega}{dt}\cdot r$, где m — масса частицы вращающегося тела, ω — угловая скорость движения.

Значительные напряжения вызываются инерционными силами при резком изменении прямолинейного движения на обратное. В качестве примера этих явлений В. Л. Кирпичев приводит движение шатуна у паровоза, машина которого делает 400 оборотов в минуту. При каждом обороте вследствие перемены направления движения на обратное шатун подвергается продольному изгибу и для обеспечения прочности поперечному сечению шатуна придают эллиптическую форму или делают его двутавровым.

С увеличением скорости поездов возрастают силы инерции, возникающие при изменении направления движения поршня со штоком, крестовины с ползуном и шатуна с кривошипом. Эти силы обусловливали неправильности в движении еще первых локомотивов Стефенсона, вызывая их качку, порчу путей. Чтобы избежать поломок, ударов или нежелательных колебаний в механизмах, прибегают к уравновешиванию сил инерции, т. е. к конструкциям, в которых инерционные силы имеют взаимно обратные направления.

Движущийся на закруглении вагон, по инерции продолжающий прямолинейное движение, оказывает боковое давление на рельсы и может даже сойти с них. Для предотвращения крушения и уменьшения давления на рельсы полотно на закруглениях делают наклонным. Наклон зависит от радиуса закругления и скорости движения вагона.

Обычно решение вопроса о наклоне пути, при котором не было бы бокового давления на рельсы, сводится к рассмотрению действия на вагон силы тяжести и реакции полотна, являющейся силой связи в системе вагон — полотно. Равнодействующая этих сил должна быть равна центростремительной силе, под действием которой вагон движется по закруглению.

Применением начала Даламбера можно упростить решение этого вопроса, исключая из рассмотрения силы связи.

Состояние вагона рассматривается, как равновесие под действием внешней силы тяжести и центробежной силы, которая считается приложенной не к связям (рельсы пути), а к самому вагону и равна $m\frac{v^2}{R}$, где m — масса вагона, v — его скорость, R — радиус закругления.

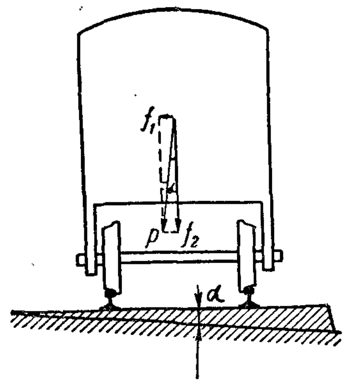

Рис. 44. Применение принципа Даламбера к решению задачи о движении вагона на закруглении пути.

Сила тяжести вагона $P = mg$ разлагается на силу давления f_2, перпендикулярную полотну дороги, и силу f_1, направленную внутрь закругления и перпендикулярную силе тяжести (рис. 44). Сила давления — «потерянная» сила, уравновешенная реакцией полотна.

Равновесие вагона определяется силой f_1 и инерционной силой, которую считаем приложенной к вагону. Чтобы не было бокового давления, сила f_1 и сила инерции должны уравновешивать друг друга, т. е. $f_1 = P\operatorname{tg}\alpha$ должна быть равна $m\frac{v^2}{R}$, или $mg\operatorname{tg}\alpha = m\frac{v^2}{R}$ и

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{v^2}{gR}.$$

Возникновением инерционных сил пользуются в технике, например для испытания прочности материалов. Брусок металла l прикрепляется одним концом к ползуну машины K, совершающему движение вверх — вниз под действием шатуна и кривошипа (рис. 45). К другому концу бруска подвешивается груз M. Вал машины быстро вращается. Поэтому брусок получает ускорение то вверх, то вниз. При этом каждый раз возникает инерционная сила, то сжимающая, то растягивающая брусок.

Такое испытание позволяет определить прочность металла, подвергающегося переменной нагрузке, наиболее разрушительной для частей механизма.

При всех расчетах, связанных с вращением тяжелых частей механизмов, нужно принимать во внимание воз-

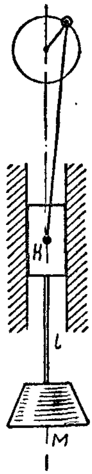

Рис. 45. Испытание бруска на прочность.

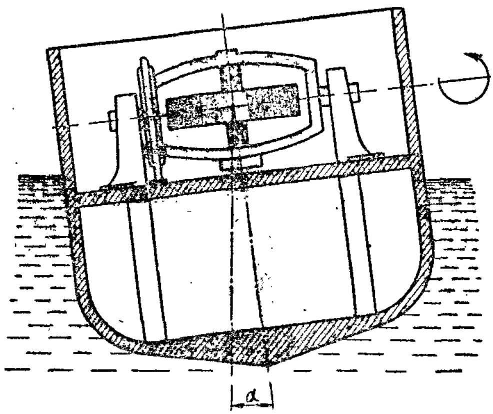

Рис. 46. Успокоитель качки судов.

никающие динамические давления. Эти давления вызываются поворотом вращающегося тела около оси, перпендикулярной к плоскости, в которой лежат действующие на него силы и его ось вращения.

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.

Для погашения боковой качки может служить массивный гироскоп. Немецкий инженер Отто Шлик предложил установить в трюме судна гироскоп, ось вращения которого была бы перпендикулярна продольной оси судна (или вертикальна или горизонтальна) (рис. 46). Если ось вращения гироскопа вертикальна, то при боковой качке она будет поворачиваться вокруг поперечной оси судна. Если же ось гироскопа горизонтальна, то при боковой качке она станет поворачиваться около вертикальной оси. В обоих случаях ось гироскопа должна иметь возможность совершать эти движения (носящие название прецессионных), происходящие в плоскости, проходящей через ее положение равновесия и продольную ось судна.

Погашение прецессионного движения гироскопа относительно судна при помощи тех или иных тормозных устройств значительно ослабляет качку. Например, при опытах на пароходе водоизмещением 900 *т* качка, достигавшая в среднем 14°, была почти вовсе уничтожена.

В современной технике гироскоп получил применение в качестве чувствительного указателя и для других целей. Кроме астатических гироскопов, у которых центр тяжести совпадает с пересечением осей карданова подвеса, применяются и гироскопические маятники, т. е. гироскопы, подвешенные в точке, лежащей выше центра тяжести.

На самолете гироскоп при отсутствии видимости может служить указателем поворота. Для этого его ось в положении равновесия устанавливается параллельно поперечной оси самолета. При повороте ось гироскопа прецессирует в плоскости, перпендикулярной к его продольной оси, и связанная с гироскопом пружина оттягивает стрелку указателя.

На том же принципе основано автоматическое устройство для управления самолетом — гиропилот. Его главная часть — горизонтальный и вертикальный гироскопы, установленные в кардановом подвесе. Импульсы от гироскопов передаются электрической системой подвижных контактов и реле к силовой рулевой установке.

Гироскопическая установка может служить указателем горизонтального направления, что имеет важное значение для определения географической широты на море, потому что при бортовой и килевой качке судна возникают силы, действующие на отвес. Одна из первых попыток применить гироскоп с этой целью была сделана еще в 80-х годах прошлого века. Приборы, указывающие искусственный «горизонт», широко распространены и в воздушном флоте.

В середине прошлого века Фуко предложил воспользоваться свойством гироскопа сохранять направление оси вращения для устройства немагнитного компаса.

Свободно вращающийся гироскоп, ось которого не меняет своего положения относительно звезд, не может служить компасом. Для применения его в качестве компаса нужно, чтобы гироскоп участвовал во вращении Земли и мог бы вращаться вокруг вертикальной оси. При этом ось гироскопа установится по направлению меридиана.

23. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТЕЙ (XVIII в.)

Развитие гидростатики и гидродинамики в XVIII в. также было успешным. Наметим основные вехи этого развития.

Галилей и Стевин изучали равновесие жидкостей под действием силы тяжести. Еванжелиста Торричелли заложил основы гидродинамики, доказав, что количества воды, вытекающей из отверстия в дне сосуда в равные времена, относятся между собой, как нечетные числа натурального ряда, если принять за единицу количество воды, вытекающей в последний промежуток времени. Отсюда следует, что изменение скорости истечения жидкости соответствует уменьшению скорости тела, брошенного вертикально вверх.

Основываясь на законах свободного падения тел, можно было сделать заключение, что частица воды вытекает из отверстия со скоростью, которую она приобрела бы, свободно падая вниз со своей первоначальной высоты над отверстием.

Так как скорость падения тела возрастает пропорционально квадратному корню из пройденного пути, то Торричелли сделал вывод, что скорости истечения, а потому и количества вытекающей из отверстия воды, относятся, как квадратные корни из высот столбов жидкости [1]. Найденные им законы гидродинамики позволили 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 от-

[1] Торричелли не был знаком с формулой $v=\sqrt{2gh}$ и считал $v=a\sqrt{h}$, где a — некоторый постоянный коэффициент.

верстием. Из короткой, загнутой вверх трубки вода должна выбрасываться вверх до той же высоты (без учета сопротивления воздуха и т. п.), на какой она стоит в сосуде, с которым соединена трубка.

Вывод, сделанный Торричелли, Ньютон попытался доказать, основываясь на некоторых постулатах о свойствах жидкости. Он предположил, что над отверстием на дне сосуда движение охватывает лишь столб жидкости, ограниченной кривой поверхностью (коноидом), а остальная часть жидкости остается в покое. Однако, измерив количество вытекающей воды, Ньютон нашел, что оно соответствовало случаю истечения жидкости с высоты, равной половине высоты сосуда.

Ошибка объяснялась тем, что Ньютон не принял во внимание сжатия струи. Если принять наименьшее сечение ее за сечение отверстия, то скорость истечения будет соответствовать выводу Торричелли.

Несмотря на приближение вывода Ньютона к результатам опыта, как указывал Лагранж, теория его не была правильной и противоречила законам гидростатики.

Только математику Даниилу Бернулли в труде «Гидродинамика», вышедшем в 1738 г., удалось заложить основы динамики жидкостей.

Даниил Бернулли (1700—1782) — один из первоклассных математиков XVIII в. 16-ти лет уже был магистром философии. При основании в 1725 г. Академии наук в Петербурге он был приглашен принять участие в ее работе. В России он пробыл восемь лет, но, не желая подчиняться академической канцелярии, руководившейся небезызвестным в истории Российской академии наук Шумахером, уехал в Базель и в университете этого города читал лекции по физике и философии.

В гидродинамических исследованиях Бернулли исходил из общего принципа сохранения «живой» силы в применении к движению идеальной несжимаемой жидкости. Он вывел основную теорему гидродинамики, применяемую к течению жидкости в каналах, трубах и при исследовании действия воды в водяных двигателях. (Вязкость жидкости Бернулли в расчет не принимал.) В частном случае истечения жидкости из отверстия в дне сосуда его вывод сводился к следующему.

Положим, что из цилиндрического сосуда с площадью сечения Q вытекает жидкость через отверстие с сечением q в его дне. За малый промежуток времени t высота жидкости H в сосуде уменьшится на h. Так как жидкость несжимаема, то между скоростью истечения v из отверстия и скоростью понижения уровня в сосуде V существует пропорциональность $\frac{V}{v}=\frac{q}{Q}$.

Жидкость с массой M, когда она находилась в сосуде, обладала энергией $\frac{MV^2}{2}+MgH$. Вытекающая вода обладает энергией $\frac{Mv^2}{2}$. По закону сохранения энергии

$$\frac{MV^2}{2}+MgH=\frac{Mv^2}{2},$$

откуда

$$H=\frac{v^2}{2g}\left(1-\frac{V^2}{v^2}\right)=\frac{v^2}{2g}\left(1-\frac{q^2}{Q^2}\right)$$

и

$$v^2=2gH\frac{Q^2}{Q^2-q^2}.$$

Это и есть уравнение Бернулли (для данного частного случая), которое при очень малом отношении $\frac{q}{Q}$ превращается в формулу, найденную Торричелли:

$$v^2=2gH.$$

При выводе этого уравнения не учитывалось трение жидкости о стенки отверстия и сужение струи, жидкость считалась идеальной, т. е. совершенно лишенной вязкости. Поэтому при решении вопросов гидравлики получаются результаты, не вполне согласующиеся с опытом.

Подвешивая сосуд с водой к чашке весов и уравновешивая его гирями, Бернулли наблюдал проявление силы реакции вытекающей струи. Несмотря на пополнение сосуда водой, компенсировавшее ее убыль при истечении через отверстие, гиря уже не уравновешивала сосуда.

Реактивное действие вытекающей струи позднее было широко использовано в технике XIX в. Прототипом гидравлической турбины было предложенное в 1750 г. инженером *А. Сегнером* (1704—1777) водяное колесо, приводившееся в движение реактивным действием вытекавшей струи воды. Эйлер теоретически исследовал это явление, поставив перед собой задачу определить полезное действие такой машины, исходя из количества протекающей воды и высоты, с которой она падает. Он дал основную формулу для расчета и несколько примеров определения коэффициента полезного действия реактивной водяной турбины.

Через несколько лет после выхода в свет труда Бернулли Даламбер положил в основу изучения движения жидкости принцип, носящий его имя, и таким образом свел законы движения жидкости к законам ее равновесия. В «Трактате о жидкостях» (1744) он решил главнейшие вопросы движения жидкостей в сосудах.

В отличие от Ньютона, сводившего сопротивление движению тела в жидкой среде лишь к лобовым ударам ее частиц, Даламбер учитывал обтекаемость движущихся в жидкости тел. Он продолжил свои гидродинамические исследования в сочинении «Опыт новой теории сопротивления жидкости», изданном в 1752 г. Но только Эйлеру удалось дать совершенно общие уравнения гидродинамики, опубликованные в трудах Берлинской академии наук в 1755 г.

Эйлер ввел понятие о давлении жидкости на движущееся тело, что было уже вполне правильным воззрением на природу этого явления. В труде «Общие принципы движения жидкости», вышедшем в 1755 г., Эйлер дал общие методы изучения движения идеальной жидкости.

По одному из этих методов составляющие скорости частиц жидкости он рассматривал как функции времени и координат точки, через которую в данный момент проходит частица жидкости. По другому методу (неправильно приписываемому Лагранжу) координаты частицы жидкости рассматривались как функции начальных ее координат и времени.

Уравнения Эйлера значительно упрощаются для несжимаемых жидкостей, когда плотность — постоянная величина. В общем виде гидродинамические уравнения Эйлера могут быть применимы и к движению газов.

Эйлер ввел в гидродинамику новое понятие о «потенциале скоростей», т. е. о функции, производные которой по координатам x, y, z представляют собой проекции скорости тела на соответствующие оси координат. В случаях, когда движение жидкости характеризуется потенциалом скоростей, уравнения Эйлера позволяют до конца решить задачу движения жидкости.

Изучая проблему сопротивления, оказываемого жидкостью движущемуся в ней телу, Эйлер открыл закон, названный по его имени «парадоксом Эйлера», заключающийся в том, что тело обтекаемой формы при равномерном движении в идеальной жидкости не должно встречать никакого сопротивления.

Так как в уравнениях Эйлера не учтена вязкость жидкостей, то эти уравнения нельзя было использовать для решения практических вопросов гидравлики (например, о течении жидкостей в трубах, каналах), требовавших экспериментального исследования.

Проблема движения вязких жидкостей и твердых тел в вязкой среде была вновь поставлена развивавшейся техникой перед механикой середины XIX в.

24. РАЗВИТИЕ МЕХАНИКИ В XIX в.

Аналитическая механика представляла собой законченную математическую теорию, в которой решение всех механических проблем было приведено к единому методу. Однако эта общность метода при решении частных задач механики нередко имела следствием недостаток наглядности и трудность правильного приложения общих формул.

Поэтому в начале прошлого века механик и математик *Луи Пуансо* (1777—1859) в сочинении «Элементы статики», вышедшем в свет в 1804 г., вновь обратился к геометрическому методу. Применяя этот метод, Пуансо показал, что если на твердое тело действует несколько сил, направления которых не пересекаются в одной точке, то действие их может быть заменено силой, сообщающей телу поступательное движение, и парой сил, вращающих его.

Пуансо с помощью простых геометрических построений исследовал вопросы о перемещении, вращении и сложении пар. Он ввел понятие «оси пары», т. е. отрезка перпендикуляра к плоскости пары, длина которого пропорциональна моменту пары (вектор момента пары), и доказал, что какие бы силы ни действовали на твердое тело, можно получить уравнения его движения, относя результирующую силу к трем осям координат, а результирующую пару сил — к трем координатным плоскостям. Приравняв же нулю проекции результирующей силы и результирующей пары сил, получим уравнение равновесия твердого тела.

Геометрический метод Пуансо позволил ему не только с большой легкостью вывести шесть условий равновесия твердого тела, но и развить наглядную теорию вращательного движения в капитальном труде «Новая теория вращения тел», вышедшем в 1834 г. В этой работе Пуансо исследовал сложение и разложение вращательных движений тела и вращение тела около одной его неподвижной точки. Он доказал, что всякое вращение тела около неподвижной точки может быть осуществлено качанием неподвижно связанного с телом конуса по другому неподвижному конусу, вершина которого остается в постоянном соприкосновении с вершиной первого конуса.

Созданная Пуансо теория вращательного движения была чисто кинематической, так как в ней не рассматривалось действие сил. Отчасти поэтому, отчасти вследствие увлечения аналитической механикой эта теория не сразу привлекла внимание. Лишь в конце 30-х годов прошлого века понятие о паре сил, без которого не может обойтись ни один курс современной механики, стало упоминаться в учебной литературе.

Важнейшее значение в развитии механики XIX в. имела теория потенциала, получившая широкое применение сначала в небесной механике, а позднее вообще в теоретической физике.

Пока тяготеющие тела вследствие огромных разделяющих их расстояний могли быть приняты за материальные точки, для расчетов было достаточно математического выражения силы тяготения $f=k\frac{mm_1}{r^2}$. Но позднее при решении астрономических и геофизических задач пришлось принимать во внимание притяжение каждой отдельной частицей притягивающего тела определенной материальной точки, например притяжение эллипсоидальной Землей тела, находящегося вблизи ее поверхности.

Лежандр (1752—1831) в поисках чисто аналитического метода решения подобных задач ввел вспомогательную, так называемую силовую, или потенциальную, функцию, частные производные которой по x, y, z равны слагающим силы тяготения по осям координат.

Понятие о потенциальной функции, или потенциале, стало применяться также при изучении магнитного и электрического полей.

Чисто математическая величина — потенциал — получила связь с физическими величинами после введения в науку ясных понятий о работе и энергии.

Положим, что материальная точка Q с массой m, находится в начале координат. В точке, характеризующейся радиусом-вектором r, находится материальная точка q, обладающая массой, равной единице и притягивающаяся к точке Q.

Для того чтобы удалить точку q в бесконечность (расстояние, на котором тела уже не взаимодействуют), необходимо совершить работу A против сил притяжения. Эта работа зависит от расстояния точки q от точки Q

$$A=A(r).$$

Обратная по знаку величина $U(r) = -A(r)$ называется потенциалом силы тяжести в точке r, создаваемым массой m. Так как U есть функция только величины r, но не ее направления, то значение этой функции одно и то же во всех точках сферы с центром в начале координат (местонахождении массы m).

Поверхности, на которых $U = \mathrm{const}$ (в данном случае сферы), носят название эквипотенциальных поверхностей.

Для перемещения «единичной» массы из положения, характеризующегося радиусом-вектором $\vec{r}_1$, в положение $\bar{r}_2$ нужно произвести работу

$$A=A(r_1)-A(r_2)=U(r_2)-U(r_1).$$

Для такого же перемещения массы m' необходима работа

$$A'=m'[U(r_2)-U(r_1)].$$

Потенциал силы тяготения $U(r)$, создаваемый массой m, находящейся в начале координат, равен

$$U(r)=-k\frac{m}{r},$$

где k — гравитационная постоянная.

Середина XIX в. была концом безраздельного господства аналитической механики, так как математическая дедукция не могла сама по себе привести к открытию каких-либо новых механических принципов. Физики вновь обратили главное внимание на экспериментальное исследование явлений и сил природы. Перед физиками и механиками вставали новые проблемы, которые не могли быть разрешены, исходя из уже известных законов механики и уравнений гидродинамики. Одной из важнейших проблем, поставленных техникой, было исследование деформаций, которым подвергаются части машин, мостов и сооружений под действием сил.

Отрасль механики, занимающаяся этими задачами, получила название теории упругости.

Теория упругости. Теория упругости отличается от других отраслей механики тем, что она имеет дело с молекулярными силами притяжения и отталкивания, действующими по законам, более сложным и менее изученным, чем законы механики Ньютона.

Изучением упругости занимался еще Галилей. Он рассматривал действие вертикальной силы на балку, закрепленную одним концом в стене. Галилей не нашел точной зависимости возникающих в балке деформаций от величины действующих на нее сил. Только *Роберт Гук* (1635—1703) в 1676 г. и независимо от него Мариотт дали один из основных законов теории упругости твердых тел. Гук сформулировал его в таком виде: «Каково растяжение, такова и сила». Этим устанавливалась пропорциональность удлинения стержня приложенной к нему растягивающей силе.

После Гука и Мариотта явление упругости изучалось Даниилом Бернулли и Эйлером, которые исследовали изгиб тонких стержней и продольный изгиб. В 70-х годах XVIII в. они вывели и уравнение поперечных колебаний балки.

В 1827 г. английский физик *Юнг* (1773—1829) экспериментально определил коэффициент пропорциональности в законе Гука для различных материалов. Этот закон оправдывался на опыте в известных пределах удлинения стержня. Как показали экспериментальные исследования, при достижении определенной для каждого материала величины относительного удлинения. эта пропорциональность нарушалась. Наконец, с увеличением растягивающего усилия наступало явление «течения» материала, и стержень удлинялся иногда даже при уменьшающемся напряжении.

Дальнейшее развитие теории упругости связано главным образом с теоретическими исследованиями французского математика *Коши* (1789—1857), который вывел общие уравнения равновесия и движения упругой изотропной среды и установил условия, которые должны осуществляться на ее границах.

На основе этих глубоких исследований была создана теория сопротивления материалов, играющая важную роль в технических расчетах при строительстве мостов и различных сооружений, конструировании механизмов, кораблестроении и т. п.

Коши, а также французский механик *Пуассон* (1781—1840) работали над теорией распространения колебаний в упругой среде. Эти исследования позволили механикам сделать некоторые выводы о строении вещества. Однако природа молекулярных сил и управляющие ими законы оставались загадкой.

Теория Пуассона и Коши не учитывала того, что упругие деформации под действием внешней силы достигают наибольшей величины не сразу, а по истечении некоторого времени после начала ее действия. С другой стороны, и возвращение тела полностью к прежней форме происходит также через некоторый промежуток времени после прекращения действия силы. Это явление получило название упругого последействия. Упругое последействие могло быть объяснено только изменением относительного расположения молекул, которые сопротивляются действию внешних сил.

Физики скоро убедились, что одними «отталкивательными» и «притягательными» силами не удается объяснить всех явлений, связанных с упругостью твердых тел. Немецкий физик *Клаузиус* (1822—1888) в работе, изданной в 1849 г., присоединился к высказывавшемуся в то время мнению, что движения молекул твердого упругого тела, находящегося под действием внешних сил, могут быть разложены на поступательные и вращательные. При этом вращение следует за внешним воздействием несколько позднее, чем смещение. Его идеи были развиты позднее *Кольраушем* (1840—1910), который пришел к выводу, что молекулы твердого упругого тела под действием давления или растяжения не сразу приходят в состояние равновесия, они оказывают сопротивление силам, приводящим их во вращение. Этим Кольрауш и объяснял явление упругого последствия твердых тел.

Как показали последующие исследования, при длительном действии сил на твердое тело, его упругие свойства несколько уменьшаются и наступает явление «ползучести», т. е. «течение» материала при напряжении, меньшем предела текучести.

«Ползучесть» твердых тел изучалась еще английским физиком *Максвеллом* (1831—1879). Согласно воззрениям этого ученого, деформация в определенный момент времени зависит не только от действующего в момент наблюдения напряжения, но и от раньше испытанных телом деформаций. При этом можно предположить, что влияние ранее действовавших напряжений на деформацию в данный момент пропорционально промежутку времени, в течение которого эти напряжения действовали, и зависит также от отдаленности их во времени от момента наблюдения.

Исходя из этих предположений и результатов экспериментов, Максвелл вывел уравнение для определения деформации тела.

$\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t}=\frac{1}{E}\cdot\frac{\Delta\sigma}{\Delta t}+\frac{1}{\eta}\sigma$, где ε — деформация тела, E — модуль Юнга, σ — напряжение, возникающее в теле под действием деформирующих сил, η — коэффициент вязкости.

Это уравнение отличается от формулы Гука добавочным членом, характеризующим влияние более ранних напряжений на последующие деформации.

Если же в уравнении Максвелла оставить только этот добавочный член, то оно будет сходно (хотя и не вполне) с уравнением, связывающим напряжения и деформации вязких жидкостей.

Следовательно, тела, деформирующиеся в соответствии с уравнением Максвелла, проявляют свойства как упругих тел, так и вязких жидкостей. Они получили название максвелловских упруго-вязких тел.

Если такое тело подвергается длительному действию силы, производящей в нем деформацию, то напряжение постепенно уменьшается, или «рассасывается». Явление «рассасывания» напряжения носит название релаксации.

Следствием его является переход упругой деформации в пластическую.

Все эти явления находят объяснение в молекулярном строении твердых тел и в изменении молекулярных сил при внешнем воздействии, изменяющем относительное положение молекул.

Как показало математическое исследование, если тело подвергалось постоянной деформации при начальном напряжении σ_0, то через промежуток времени τ напряжение σ определится по формуле $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ где t — время, в течение которого тело находилось под влиянием напряжения, τ — период релаксации, в течение которого напряжение уменьшается в e раз.

У аморфных тел период релаксации не зависит от напряжения и согласно приведенной формуле напряжение σ с течением времени должно стремиться к нулю. Однако исследования, проведенные *Ф. Н. Шведовым* в конце прошлого века, показали, что этот вывод во многих случаях оправдывается не вполне.

Развитие машиностроения и применение механизмов в промышленности поставили и другую задачу перед механикой — научное обоснование понятий о работе, мощности и энергии, которыми пользовались техники.

Работа и энергия. Понятие о работе под разными названиями (динамический эффект и др.) можно найти в трудах некоторых ученых XVIII в. Например, Томас Юнг писал: «Почти во всех случаях, встречающихся в практической механике, работа, необходимая для воспроизведения движения, пропорциональна не моменту, а энергии произведенного работой движения. Словом «энергия» следует обозначать произведение массы или веса тела на квадрат числа, выражающего скорость».

В конце первой четверти XIX в. понятие о работе было точно сформулировано французским механиком *Понселе* (1788—1867) и стало играть важную роль в механике. Под работой он понимал произведение силы на путь, пройденный телом, если оно не получает ускорения. В этом случае сила преодолевает какое-то сопротивление, например трение.

В результате длительных опытов и наблюдений техники и механики должны были убедиться, что при всякой механической передаче силы (без трения) произведенная силой работа остается неизменной, т. е. никакой механизм не создает энергии, а только передает ее. Этот вывод, основанный на опыте, находился в соответствии с утверждением Леонардо да Винчи, Стевина, Галилея и других механиков средних веков ложности идеи создания двигателя, который производил бы работу без сообщения ему энергии извне. Например, Леонардо да Винчи указывал, что нельзя построить часы, которые сами поднимали бы приводящие их в движение гири. На невозможности вечного двигателя основывалось и доказательство Стевином закона наклонной плоскости. Галилей, доказывая, что твердое тело одинаковой плотности с жидкостью будет сохранять в ней равновесие, также исходил из положения о невозможности вечного двигателя.

Однако, пока в механике не был твердо установлен закон сохранения энергии, вопрос о вечном двигателе, производящем работу или по крайней мере сохраняющем движение без действия внешней силы, не был окончательно решенным. Например, когда в Европе распространилось сообщение о построенном неким Орфиреусом в 1712 г. колесе, которое будто бы могло само по себе вращаться неопределенно долгое время, то им заинтересовался лейденский профессор физики Гравезанд. При внешнем осмотре колеса, внутреннее устройство которого для Гравезанда осталось неизвестным, этот физик дал о нем благоприятный отзыв и писал Ньютону, что он считает идею о вечном двигателе осуществимой.

Только в 1755 г. Парижская академия наук, наконец, прекратила рассмотрение проектов вечного двигателя, в большом числе поступавших от изобретателей.

Декарт и его последователи считали движение неуничтожаемым, а силы — воздействием движущегося тела. М. В. Ломоносов сформулировал свой принцип сохранения: «Все изменения, случающиеся в природе, 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 всеобщ, то он простирается даже в правила движения, и тело, побуждающее своим толчком другое к движению, столько же теряет своего движения, сколько сообщает другому, движимому им».

Картезианское представление о сохранении общего количества движения во Вселенной возникло из глубоко материалистической философской концепции. Механиков же интересовал вопрос о сохранении в системе «живой» силы, или механической энергии.

Рассматривая этот вопрос, механики пришли к понятию о консервативных силах, работа которых на пути между двумя точками не зависит от формы пути. Для этих сил всегда существует силовая функция. Силовая функция, взятая с обратным знаком, представляет собой потенциальную энергию. К числу консервативных сил относятся, например, сила тяготения, сила упругости, силы притяжения или отталкивания электрических зарядов.

Но в природе наблюдаются и неконсервативные силы, не имеющие силовой функции, как например сила трения и сопротивления среды.

Механические системы, в которых действуют только консервативные силы, носят название консервативных систем. Закон сохранения механической энергии для консервативных систем был доказан немецким физиком *Германом Гельмгольцем* (1821—1894).

По образованию врач, Гельмгольц в 1824 г. был ординатором в больнице, с 1848 г.— преподавателем анатомии и физиологии, а с 1871 г.— профессором физики в Берлине.

В возрасте 28 лет Гельмгольц написал работу «О сохранении силы», опубликованную в 1847 г. В ней он доказывал, что в системе тел, между которыми действуют лишь центральные силы, количество кинетической энергии остается постоянным. При этом Гельмгольц исходил из известного уже тогда принципа сохранения «живой» силы и невозможности вечного двигателя.

Отмечая, что для поднятия на высоту h тело должно иметь ту же начальную скорость $v=\sqrt{2gh}$,какую оно приобретает при падении с этой высоты, Гельмгольц указывал, что $mv^2 = 2\,mg$ и $\frac{mv^2}{2} = mgh$, т. е. «живая» сила в конце падения тела равна работе, произведенной силой тяжести на протяжении пути его движения. Распространяя этот закон на систему материальных точек, он писал: «Если любое число подвижных материальных точек движется только под влиянием таких сил, которые зависят от взаимодействия точек друг на друга или которые направлены к неподвижным центрам, то сумма живых сил всех взятых вместе точек останется одна и та же во все моменты времени, в которые все точки получают те же самые относительные положения друг по отношению к другу и по отношению к существующим неподвижным центрам, каковы бы ни были их траектории и скорости в промежутках между соответствующими моментами»[1].

Далее Гельмгольц ввел понятие о потенциальной энергии, противопоставляя его «живой силе» и доказал следующее положение: «Во всех случаях движения свободных материальных точек под влиянием исходящих из них притягательных или отталкивательных сил, величины которых зависят только от расстояния, уменьшение количества работы, которую можно от системы получить, всегда равно увеличению живой силы, и, наоборот, увеличение первой величины — уменьшению второй. Следовательно, вся сумма существующих в системе потенциальной энергии и живых сил постоянна. В этой наиболее общей форме мы можем наш закон назвать принципом сохранения силы».

Свои выводы, касающиеся лишь механических сил, Гельмгольц сформулировал в следующих положениях:

1) Когда тела природы действуют друг на друга с силами притяжения или отталкивания, независимыми от времени и скорости, то сумма их живых сил и потенциальной энергии остается постоянной; максимум работы, которую можно получить, является, таким образом, определенным, конечным.

2) При равновесии системы тел под действием центральных сил внутренние и внешние силы должны находиться в равновесии, если тела системы неизменно соединены друг с другом и по отношению к лежащим снаружи телам подвижна только система в целом. Твердая система, состоящая из подобных тел, никогда не может быть поэтому приведена в движение действием своих внутренних сил, но это движение может возникнуть только при действии внешних сил.

Так Гельмгольцем был сформулирован принцип сохранения количества движения в замкнутой системе.

Изложенные соображения Гельмгольца, доложенные

[1] Г. Гельмгольц, О сохранении силы, Госиздат, 1922.

им на заседании Физического общества в Берлине 23 июля 1847 г., были настолько неожиданны, что редактор известного журнала *«Annalen der Physik»* отказался поместить его статью. После опубликования работы «О сохранении силы» в первое время лишь знаменитый математик *Карл Якоби* (1804—1851) поддерживал мнение Гельмгольца.

Необходимо, однако, отметить механицизм выводов Гельмгольца и ошибочность некоторых из них. Так, Гельмгольц утверждал, будто бы «если в телах природы находятся силы, которые зависят от времени и скорости или которые действуют не по направлению двух действующих друг на друга материальных точек и, следовательно, например, являются вращающими силами, то возможна такая комбинация подобных тел, при которой сила или беспредельно теряется, или получается», а также «если бы имелись иные силы, кроме центральных, то можно было бы установить такие твердые связи тел природы, которые позволили бы системе двигаться самой по себе без всякого отношения к другим телам».

Если бы эти положения были справедливы, то доказанная многочисленными опытами невозможность создания вечного двигателя свидетельствовала бы о том, что в природе нет других сил, кроме тех, которые зависят от расстояния между центрами.

Между тем еще ранее *В. Вебер* (1804—1891) пришел к выводу, что электродинамические силы зависят не только от расстояния между движущимися заряженными частицами, но и от их скоростей. На эти силы не могли бы быть распространены выводы Гельмгольца. Однако доказано, что и эти силы имеют потенциал и должны подчиняться закону сохранения механической энергии. Никакие позднейшие исследования также не открыли существования в природе сил, не подчиняющихся этому закону.

Сам Гельмгольц позднее признал, что его положение о применении закона сохранения энергии только к центральным силам слишком узко и не оправдывается опытом.

Закон сохранения механической энергии — лишь частный случай более общего физического закона сохранения энергии.

Понятие об энергии было сформулировано английским физиком *Ранкиным* (1820—1874) в работе «Об общем законе преобразования энергии»: «Энергия — это всякое свойство вещества, которое представляет собою силу или сравнимо с силой, способной производить изменения, сопровождающиеся преодолением сопротивления».

Наблюдениями было установлено, что при механических процессах энергия как бы теряется. Еще Лейбниц обращал внимание на потерю «живой» силы при соударении неупругих тел, причем высказал предположение, что потерянная сила поглощается частицами тела.

Нагревание тел при трении было общеизвестным фактом и до работ Гельмгольца. Техники постоянно изыскивали способы уменьшения трения и охлаждения частей машин. От этих наблюдений был только один шаг до мысли о переходе механической работы в теплоту. Но только американец *Бенжамин Томпсон* (1753—1814) доказал это.

Присутствуя в 1798 г. при сверлении пушек. Томпсон обратил внимание на сильное нагревание пушечного ствола и металлических стружек, причиной которого было превращение работы, совершаемой при движении сверла, в теплоту. Чтобы проверить этот вывод, он поставил специальные опыты: вращая тупое сверло в канале погруженного в воду стального цилиндра ему удалось не только нагреть воду, но даже довести ее до кипения.

Несколько позднее известный английский химик *Дэви* (1778—1829) наблюдал, что при трении друг о друга двух кусков льда они растаяли, причем получившаяся вода имела более высокую температуру, чем окружающий воздух.

Описанные опыты уже наводили на мысль, что теплота представляет собой механическую энергию колеблющихся или хаотически движущихся молекул,— мысль, высказывавшаяся еще М. Ломоносовым. Для окончательного доказательства правильности этой идеи нужно было найти механический эквивалент теплоты.

Первый шаг в этом направлении был сделан немецким врачом *Юлиусом Робертом Майером* (1814—1878), опубликовавшим в 1842 г. большую статью, а в 1845 г.— законченную работу «Органическое движение в связи с обменом веществ», в которых изложил свои оригинальные физические идеи о движении и силах.

Майер впервые определил механический эквивалент теплоты, исходя из сравнения теплоемкости воздуха при постоянном объеме и при постоянном давлении: «Один кубический сантиметр атмосферного воздуха при 0° и при барометре, показывающем 0,76 *м*, весит 0,0013 *г.*; будучи нагрет при постоянном давлении на 1° С, он расширяется на 1/274 своего объема и тем самым поднимает столб ртути с основанием в один квадратный сантиметр и высотою в 76 *см* на 1/274 *см*. Вес такого столба составляет 1033 *Г*. Удельная теплоемкость атмосферного воздуха при постоянном давлении, если принять теплоемкость воды за единицу, равна, по Деларошу и Берару, 0,267; следовательно, количество тепла, принимаемого нашим кубическим сантиметром воздуха для того, чтобы при постоянном давлении повысить свою температуру с 0 до 1°, равно тому количеству тепла, с помощью которого 0,0013·0,267, или 0,000347 *Г* воды нагревается на 1°. По Дюлонгу, за которым следует большинство физиков в данном вопросе, количества теплоты, которые воздух принимает при постоянном объеме и постоянном давлении, относятся друг к другу, как 1 : 1,421; сообразно с этим исчисляется, что для нагревания нашего кубического сантиметра воздуха на 1° при постоянном объеме требуется количество тепла, равное $\frac{0,000347}{1,421} = 0,000244°$. Следовательно, разность 0,000347—0,000244 = 0,000103° и есть то количество теплоты, благодаря применению которого груз весом 1033 *Г* был поднят на высоту 1/274 *см*. Отсюда, после пересчета, получается, что 1° теплоты равен 1 *г*, поднятому на 425 *м* высоты» [1].

Физики сначала отнеслись очень равнодушно к закону сохранения и превращения энергии главным образом потому, что он был утверждением единства сил природы, имевшим натурфилософский характер. Те же из них, которые склонны были признать этот закон, не считали убедительным философское обоснование его, данное Майером.

---

[1] Ф. Розенбергер, История физики, т. III, вып. 2, ОНТИ, 1937, стр. 18—19. (Майер применяет вместо калории понятие градуса — *Б.* и *М.*)

Но эксперименты английского физика *Джемса Джоуля* (1818—1889) привлекли внимание ученых к новому физическому принципу, играющему первостепенную роль в современной науке.

Занимаясь исследованиями электромагнетизма, Джоуль в результате своих опытов пришел к мысли установить отношение между током и выделяющимся в проводнике количеством теплоты. Первая работа по этому вопросу «О тепловом эффекте магнитоэлектричества и механическом значении теплоты» была опубликована Джоулем в 1843 г.

Чтобы решить вопрос о происхождении теплоты в цепи электрического тока, Джоуль поместил в плотно закрытый стеклянный сосуд с водой небольшую катушку. Сосуд был приведен в быстрое вращение между полюсами сильного неподвижного электромагнита. Измеряя количество теплоты, возникавшей при прохождении в цепи индукционных токов, Джоуль пришел к выводу, что теплота, выделяющаяся током, пропорциональна (при прочих равных условиях) квадрату тока.

Исходя из возникшей у него идеи, что теплоту можно получить при помощи механических сил, Джоуль стал вращать электромагнит падающим грузом. Таким путем он установил, что определенному количеству механической работы соответствует определенное количество теплоты.

Для доказательства справедливости этого закона и для получения точного значения механического эквивалента теплоты Джоуль произвел множество опытов. Он приводил в движение поршень с отверстиями в сосуде с водой, определяя при этом нагревание воды; сжимал при помощи нагнетательного насоса воздух до 22 *атм*, измеряя повышение температуры; приводил в движение помещенное в сосуде с водой колесо и т. п.

Из длинного ряда таких опытов Джоуль вывел, что количество теплоты, получающейся при трении твердых или жидких тел, всегда пропорционально затраченной механической работе. По его подсчетам (переведенным в современные меры), для получения количества теплоты, которое может нагреть 1 *кг* воды на 1° С, нужно затратить механическую работу, равную 424 *кГм*. В отличие от Майера, Джоуль ставил на первый план вывод механического эквивалента теплоты, а не доказательство закона сохранения энергии.

Работы Майера и Джоуля послужили основой для дальнейшего развития механической теории теплоты, в которой чувствовалась настоятельная потребность в связи с применением в промышленности паровых машин.

В своей работе «Некоторые замечания о теплоте и строении упругих жидкостей», вышедшей в 1851 г., Джоуль развивал идею о том, что теплота упругих жидкостей (газов.— *Б.* и *М.*) обусловливается прямолинейным поступательным движением их молекул, которые движутся с большими скоростями во всех направлениях. Температура же газов пропорциональна «живой силе» движения их молекул. Исходя из этого воззрения на природу теплоты, Джоуль вычислял среднюю скорость движения молекул газа, зная его давление и принимая молекулы за абсолютно упругие шарики.

Так было положено начало кинетической теории газов, развитой в дальнейшем Клаузиусом, Максвеллом и Больцманом.

Признав существование постоянного количественного отношения между механической энергией и теплотой, физики убедились в реальности факта сохранения энергии, установленного столь различными методами Майером и Гельмгольцем. Вместе с этим открылась возможность обобщения сделанных ими выводов в закон превращения и сохранения энергии вообще.

25. РАЗВИТИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ В РОССИИ

Механика в России XVIII в. носила чисто прикладной характер. В Морской академии, в Инженерной и Артиллерийской школах (учебных заведениях, основанных в 1712—1715 гг.) уже преподавалась теория простых механизмов.

Промышленность, военное дело, мореплавание и строительство развивались так быстро, что скоро имеющихся знаний в области механики стало недостаточно.

Для удовлетворения потребности в теоретических руководствах уже в первой половине XVIII в. начались составление и переводы книг с западноевропейских языков.

В 1722 г. вышла небольшая книжечка «Наука статистическая, или механика» *Г. Г. Скорнякова-Писарева*, изучавшего физико-математические науки в Германии и Италии. Это было первое сочинение по механике русского автора. В нем излагались законы равновесия тел, находящихся под действием различно направленных сил, в применении к теории простых механизмов.

При основании в 1725 г. Русской академии наук в Петербурге в ней начали работать известнейшие механики того времени — Даниил Бернулли, Герман, Бильфингер, а позднее и Леонард Эйлер.

В течение второй половины XVIII в. промышленность и техника в России неуклонно развивались, в первой половине XIX в. началось строительство железных дорог. Понадобились новые высшие учебные заведения. В 1810 г. был открыт Институт инженеров путей сообщения, в 1828 г.— Петербургский технологический институт, а в 1842 г.— Институт гражданских инженеров.

Деятельность Русской академии наук и возникновение технических высших учебных заведений способствовали развитию в России как физики вообще, так и главнейшей в то время ее части — механики. Появились талантливые преподаватели и ученые, занимавшиеся не только чтением лекций, но и самостоятельными исследованиями.

Применение начала возможных перемещений получило дальнейшее развитие в трудах замечательного русского математика *М. В. Остроградского* (1801—1862).

М. В. Остроградский, не закончив среднего образования, посещал в качестве вольнослушателя Харьковский университет. В 1817 г. он был зачислен в студенты физико-математического отделения этого университета и проявил необыкновенные способности в области математики.

Нежелание молодого Остроградского слушать лекции богословия и философии помешало ему получить университетский диплом. Поэтому в 1822 г. он уехал в Париж, где посещал лекции знаменитых французских математиков того времени.

Одновременно Остроградский вел и самостоятельные исследования. В 1826 г. он написал научное сочинение о волновом движении жидкости в цилиндрическом бассейне, требовавшее солидных знаний как в области математики, так и в области динамики жидкостей.

Работа Остроградского получила лестные отзывы видных парижских математиков. В 1830 г. он был избран экстраординарным, а через год — ординарным академиком. Остроградский стал основателем школы русских механиков-аналитиков. Наиболее важные из его трудов были посвящены обобщению принципов и методов механики. Особенно важное значение имело обобщение начала возможных перемещений на случай неудерживающих связей.

Общее условие равновесия системы по Лагранжу заключается в том, что сумма произведений сил на возможные их перемещения равна нулю. Возможные перемещения определяются связями системы.

Лагранж при установлении принципа возможных перемещений считал связи двусторонними, или «удерживающими». Такие связи, не допуская движения в одном направлении, не допускают его и в прямо противоположном направлении. Обыкновенный подшипник представляет собой пример двусторонней, или «удерживающей» связи: он не «дозволяет» (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». Например, подшипник без крышки не препятствует поднятию вала, удерживаемого на месте только собственной тяжестью и весом маховика.

Лагранж и все механики XVIII в. считали, что начало возможных перемещений приложимо только к двусторонним связям. Остроградский же распространил принцип возможных перемещений и на односторонние, или «неудерживающие», связи, в случае которых для равновесия системы необходимо выполнение условия: $P\alpha+Q\beta+R\gamma+\ldots\leqslant 0$, где P, Q, R — силы, приложенные к телам системы; α, β, γ — возможные перемещения их, т. е. сумма элементарных работ всех заданных сил на любом возможном перемещении системы должна быть или отрицательной или равной нулю величиной.

Это исследование М. В. Остроградского явилось завершением метода составления условий равновесия системы на основе принципа возможных перемещений.

Лагранж в своей «Аналитической механике» вовсе не коснулся вопроса о приложении начала возможных перемещений к соударению тел. Остроградский, рассматривая эту проблему, исходил из такой идеи: силы, возникающие при соударении тел, можно рассматривать как реакции связей; в начальный момент они соответствуют скоростям точек системы, но в течение очень короткого времени эти силы быстро изменяются и производят изменение скоростей.

В применении к соударению тел принцип Даламбера выражается в том, что приложенная к телу сила удара уравновешивается с «потерянными» при ударе количествами движения, а потому к изучению удара могут быть применены законы статики [1].

Положим, что тело массы m, находящееся на наклонной плоскости, связано гибкой нерастяжимой нитью с телом массы m_1, и система находится в состоянии равновесия. На массу m подействовал удар силой P. Нужно найти скорость v, с которой будут двигаться эти тела после удара.

Условие равновесия (по принципу Даламбера) заключается в том, что сила, действующая на тело m в направлении удара должна быть равна силе, действующей на тело m_1 в противоположном направлении. Кроме силы удара P, нужно ввести потерянные количества движения, т. е. разности $0 - mv$ и $0 - m_1v$. Условие равновесия выразится уравнением $P - mv - m_1v = 0$, откуда скорость $v = \dfrac{P}{m+m_1}$.

Положим, что удар нанесен телу, которое может вращаться около неподвижной оси.

Условие равновесия заключается в равенстве нулю суммы моментов всех сил относительно оси вращения. Чтобы получить уравнение движения, нужно приравнять нулю сумму момента силы удара и моментов потерянных количеств движения.

Если J — момент инерции тела относительно оси вращения, а ω — окончательная угловая скорость вращения после удара, то так как начальное количество движения равно нулю, момент потерянного количества движения

---

[1] В. Л. Кирпичев, Беседы по механике, Гостехтеоретиздат, 1950, стр. 301.

будет $0 - J\omega = J\omega$. Поэтому, согласно принципу Даламбера, $M - \omega J = 0$, где M — момент силы удара относительно оси вращения тела. Отсюда угловая скорость равна $\omega = \frac{M}{J}$.

Этот вывод имеет большое значение для движения механизмов, так как потеря кинетической энергии движущихся частей машин влечет за собой снижение ее коэффициента полезного действия.

Работами М. В. Остроградского начался период развития аналитической механики в России. Как физик Остроградский следовал за Ньютоном, признавая действие сил на расстоянии. Влияние его было очень сильным в России, и с середины XIX в. картезианство уже не находило сторонников среди русских механиков.

Видным продолжателем аналитического направления механики в России был *Ф. А. Слудский* (1841—1896). Развивая аналитический метод Лагранжа и Остроградского, Слудский, однако, уже понимал ограниченность этого метода. В предисловии к своему «Курсу теоретической механики», изданному в 1881 г., он писал: «Я понимал вполне значение для механики метода геометрического, завещанного еще великим Ньютоном, и признавал необходимость дать этому методу в ее изложении надлежащее участие».

Слудский, как и большинство физиков того времени,— крайний ньютонианец. Силы тяготения он считал явлением, не требующим какого-либо механического объяснения. «Силы суть свойства элементов вещества действовать друг на друга на расстоянии — притягиваться или отталкиваться,— писал он» [1].

Задача механики, по его мнению, заключается лишь в сведении сложного к более простому. «Объяснить явления — не значит в естествознании раскрыть их сущность: это значит лишь объяснить связь между ними и определить их причины — их необходимые физические условия... Разбить сложное явление на простейшие элементарные, показать, как оно слагается из этих элементарных,— вот что значит для натуралиста объяснить

---

[1] Ф. А. Слудский, Механика будущего. Математический сборник, т. IX, 1878, стр. 9.

явление. Явления элементарные, само собою разумеется, никакому объяснению уже не подлежат»[1].

В воззрениях на силу Слудский был крайним ньютонианцем. Силу, существующую независимо от толчков или давления материальных частиц и действующую на расстоянии без посредства материальной среды, он считал основой физики.

С середины XIX в. механики стали усиленно заниматься исследованиями вращения тел и влияния на вращения возмущения, создаваемого внешними силами, а также исследованием собственного движения тел во вращающихся системах.

Основной проблемой до того времени являлось вращение тел, симметричных относительно оси вращения, изучение которых было начато еще Эйлером, но не могло считаться законченным. Дальнейшее развитие теория вращения волчка получила в работах русского математика *С. В. Ковалевской* (1850—1891).

Еще в раннем возрасте Ковалевская проявила замечательные математические способности и стремление к научным знаниям. Даже в детстве она часами просиживала у стены комнаты деревенского дома ее отца, случайно оклеенной листами литографированных лекций дифференциального и интегрального исчислений, разбирая и приводя в связь отдельные страницы. Когда пятнадцати лет Ковалевская стала брать уроки высшей математики, то внешний вид формул был ей уже знаком, и она удивляла преподавателя той легкостью, с какой усваивала понятия о пределах и производных.

Родители Ковалевской не поощряли ее желания изучать математику, и, чтобы получить эту возможность, девушка вышла замуж за В. О. Ковалевского, позднее получившего большую известность в качестве специалиста палеонтолога. Вместе с мужем она уехала в Германию, где брала уроки у известного математика *Вейерштрасса* и слушала лекции знаменитого физика Гельмгольца. По представлению Вейерштрасса, через четыре года Геттингенский университет присудил С. В. Ковалевской ученую степень доктора без установленных для этого экзаменов.

---

[1] Ф. А. Слудский, Механика будущего. Математический сборник, т. IX, 1878, стр. 10.

По возвращении в Россию Ковалевская не могла в те времена найти бо́льшего применения своим математическим познаниям, чем преподавание арифметики в младших классах гимназии. Она просила допустить ее к сдаче экзаменов на степень магистра при Московском университете, но не получила разрешения министра народного просвещения. Тогда Ковалевская решила покинуть Россию и вернулась в Берлин.

В 1883 г. С. В. Ковалевская получила приглашение читать лекции по математике в Стокгольмском университете. Она уехала в Швецию, где прочитала двенадцать курсов по разным разделам математики. Там она и скончалась, заболев воспалением легких после поездки в Италию.

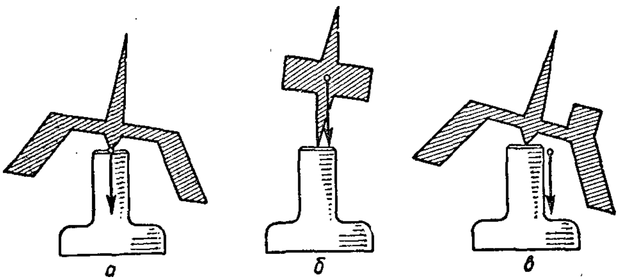

Рис. 47. Волчки, изученные Эйлером, Лагранжем и Ковалевской.

В 1889 г. С. В. Ковалевская была избрана Российской академией наук в члены-корреспонденты,— первый случай в России, когда женщина получила такое звание.

До Ковалевской Эйлер, Пуансо и Лагранж исследовали вращение волчка, с центром тяжести на оси вращения. Первые два из этих ученых вывели уравнения вращения волчка, центр тяжести которого совпадает с точкой опоры (рис. 47, *а*). Лагранж рассмотрел более сложный случай, когда центр тяжести волчка находится выше точки опоры, но все-таки лежит на его оси симметрии (рис. 47, *б*).

После этих исследований вопрос о вращении твердого тела не получил в течение десятков лет дальнейшего развития. Хотя Парижская академия наук назначила специальную премию за решение задачи о волчке в общем виде, до Ковалевской никому не удалось найти правильного ее решения.

В 1888 г. С. В. Ковалевская представила труд «Задача о вращении твердого тела вокруг неподвижной точки» на конкурс, объявленный Парижской академией наук (под девизом: «Говори, что знаешь; делай, что обязан; будь, чему быть»). Комиссия, рассматривавшая представленные работы, отметила, что мемуар Ковалевской является «замечательным трудом, который содержит открытие нового случая... автор не удовольствовался прибавлением результата к тем решениям, какие перешли к нам по этому предмету от Эйлера и Лагранжа, а сделал из своего открытия углубленное исследование с применением всех возможностей современной теории функций», и присудила ее автору премию, которую в течение 60 лет до того не удалось получить никому.

В этой работе Ковалевская исследовала вращение особого рода волчка, отличавшегося от изученного Эйлером тем, что на внешнем крае его был добавочный груз (рис. 47, *в*). Поэтому точка опоры волчка не совпадала с его центром тяжести, смещенным в сторону. Решение этой задачи представляло большие математические трудности. Оно требовало основательных специальных знаний, обладая которыми Ковалевская довела исследование до конца.

Работа С. В. Ковалевской нарушила затишье, наступившее в мировой науке после исследований Эйлером, Лагранжем и Пуассоном проблемы вращения твердых тел... Она открывала широкую перспективу дальнейших исследований и повлекла за собой ряд новых работ по теории вращения твердого тела других ученых — Н. Е. Жуковского, А. М. Ляпунова, С. А. Чаплыгина.

Еще в середине прошлого века делались попытки решения некоторых частных задач динамики тел переменной массы, которые не ставились в механике Ньютона. Полная теория движения таких тел была дана русским механиком *И. В. Мещерским* (1859—1935).

Мещерский родился в Архангельске и окончил там среднюю школу. Высшее образование он получил в Петербургском университете, где был оставлен в 1882 г. при кафедре механики. Через 20 лет, когда открылся

Петербургский политехнический институт, Мещерский был приглашен заведовать кафедрой механики. В этом институте он оставался профессором до конца жизни.

Еще в самом начале своей научной деятельности И. В. Мещерский занялся изучением движения тел, масса которых уменьшается или увеличивается во время движения. При изменении массы тела, т. е. при отделении от тела частиц с некоторой скоростью, должна возникать реактивная сила. Примером может служить ракета, движение которой происходит под действием реактивной силы вытекающих из нее газов.

Вывод законов движения тел переменной массы в таком общем случае был затруднительным. Поэтому Мещерский начал с частного случая, когда относительная скорость отделяющихся частиц в момент отделения равна нулю. Примером такого явления может служить сбрасывание балласта с аэростата.

В 1897 г. И. В. Мещерский уже вывел общее уравнение движения тел переменной массы при любых относительных скоростях отделяющихся частиц. Это уравнение является исходным при всех расчетах движения тел переменной массы, как например ракетных летательных аппаратов.

Самим Мещерским была решена задача о восходящем движении ракеты, поднятие которой вызывается реактивным давлением струи газов, образующихся от сгорания в ней пороха и, следовательно, связано с уменьшением ее массы. Им было также рассмотрено вращение вала, с которого сбегает навернутая в один ряд тяжелая цепь. Формулы, данные Мещерским, могли быть применены к расчетам движения грузов, спускаемых или поднимаемых в шахтах при помощи лебедок, к вращению вала типографской печатной машины, на котором разматывается рулон газетной бумаги, и т. п. Но работа Мещерского не привлекла должного внимания механиков и техников. Она опередила на несколько десятков лет потребности практики.

Только астрономы-теоретики оценили ее, получив формулы для исследования движения тела переменной массы под действием центральной оси, примером которого может служить любая комета. В небесной механике данные Мещерским формулы скоро получили название «законов Мещерского».

В наше время, когда реактивные самолеты и ракетная техника получили огромное практическое значение, данные И. В. Мещерским законы динамики тел переменной массы легли в основу всех расчетов, связанных с проектированием высотных самолетов и межпланетных снарядов-ракет.

26. ДИНАМИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ В XIX в.

Одной из важных задач техники XIX в. было создание двигателя, осуществляющего быстрое вращение. Этой цели отвечали турбины. Первыми были изобре-

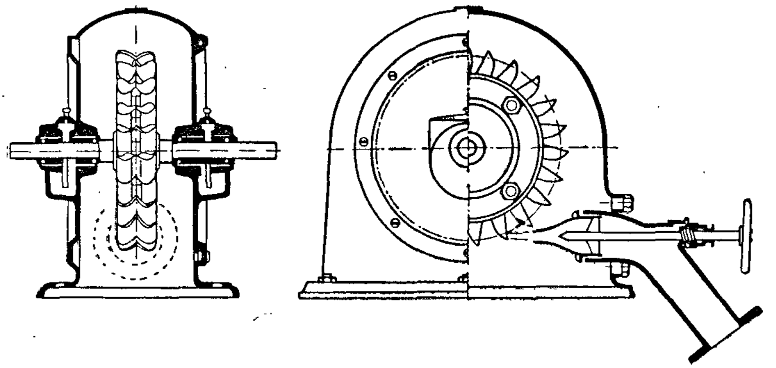

Рис. 48. Турбина Пельтона.

тены водяные турбины, прообразом которых являлось употреблявшееся еще в средние века в нашей стране «мутовчатое колесо».

В XIX в. строились и совершенствовались два типа турбин: свободноструйные и реактивные.

В турбинах первого типа свободная струя воды ударяет в лопатки колеса, передавая им свою кинетическую энергию. К числу таких турбин принадлежит турбина *Пельтона* (рис. 48).

В свободноструйной гидравлической турбине вода поступает из сопла в рабочее колесо при атмосферном давлении со скоростью, близкой к скорости истечения из отверстий, определяемой по формуле $v = \sqrt{2gh}$. Поверхность струй между лопастями колеса может свободно соприкасаться с атмосферным воздухом.

Реактивные турбины приводятся во вращение реактивным давлением воды, текущей в изогнутых каналах между лопатками рабочего колеса. В реактивной турбине колесо помещается в закрытом пространстве, куда вода поступает из многолопаточного направляющего аппарата под давлением, большим атмосферного (рис. 49). Вода полностью заполняет все каналы, не имея свободной поверхности. Давление воды по мере

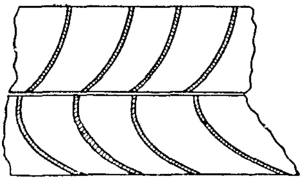

Рис. 49. Направляющее и рабочее колеса реактивной турбины Жонваля.

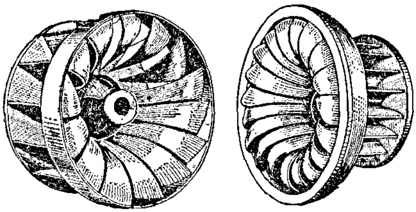

Рис. 50. Рабочее колесо турбины Фрэнсиса.

течения в суживающихся каналах уменьшается, а относительная скорость движения увеличивается.

Одна из первых реактивных турбин была изобретена и построена русским техником *И. Е. Сафоновым* (1806—1850), установившим такие турбины на Алапаевском, Ирбитском и Нейво-Шайтанском заводах. Вода в турбину подавалась под давлением по трубе; затем она поступала вдоль оси во внутреннее неподвижное колесо, протекала между его лопатками, направлявшими ее в каналы рабочего колеса. Почти одновременно подобная же турбина была самостоятельно изобретена инженером *Фурнейроном.*

Позднее американский инженер *Фрэнсис* построил турбину, у которой вода поступала через направляющий аппарат во внутреннее концентрическое рабочее колесо (рис. 50). Протекая между его лопатками, она выходила вдоль оси турбины наружу. Это достигалось применением лопаток двоякой кривизны.

Распространение гидравлических турбин, создание подводных лодок, кораблестроение и другие технические задачи послужили стимулом к более углубленному изучению свойств реальных жидкостей и созданию теории их движения. Хотя в этих исследованиях жидкости считались несжимаемыми, полученные выводы оказалось возможным применить (при некоторых условиях) и к газам.

Начатые Л. Эйлером и Д. Бернулли гидродинамические исследования касались только идеальной жидкости, т. е. сплошной среды, частицы которой не оказывают никакого сопротивления сдвигу. Реальные же жидкости обладают большей или меньшей вязкостью, и результаты расчетов, основанных на законах, выведенных для идеальных жидкостей, не согласовывались с опытом.

Лагранж установил основные положения плоского («слоевого») безвихревого движения жидкости. Но движение тел в вязкой жидкости при значительной скорости сопровождается образованием вихрей, на что указывал еще Эйлер. Точное понятие о вихревом движении жидкости было введено в гидродинамику в 1821 г. французским математиком Коши.

Наблюдения за движением жидкостей в трубах привело к понятию о турбулентности. Исследования *Пуазейля* (1799—1869) и *Рейнольдса* (1842—1912) показали, что при определенных условиях жидкость перемещается не отчетливо выраженными струями (ламинарное движение), а беспорядочно. Это последнее движение и получило название турбулентного. Рейнольдс определил и условия, при которых возникает это движение жидкости.

Для изучения турбулентного движения он предложил ввести средние скорости, средние напряжения и тому подобные усредненные по времени величины. В результате он вывел уравнения турбулентного движения. Однако в его пять уравнений входило одиннадцать подлежащих определению величин.

А. А. Фридман (1888—1925) и другие советские физики и математики увеличили число определяющих турбулентное движение жидкости уравнений, дающих более определенные решения. Наконец, в трудах советского физика академика *А. Н. Колмогорова* дана общая схема развития турбулентности, основанная на некоторых допущениях о статическом режиме участков потока, охваченного турбулентным движением.

Результаты гидродинамических исследований применимы и в области аэродинамики — науке о движении газов и о воздействии их на обтекаемые тела. Аэродинамика первоначально основывалась на представлениях Ньютона, что взаимодействие движущегося воздуха и твердых тел заключается лишь в ударе частиц воздуха о лобовую поверхность тела. Согласно этой теории сила давления воздушного потока на площадку s, поставленную под углом α к направлению движения воздуха, выражается формулой $R = \rho s v^2 \sin^2\alpha$, где v — скорость относительного движения тела и воздуха, ρ — плотность воздуха. Однако вычисленные по этой формуле величины не согласуются с данными практики, и теория Ньютона задержала развитие авиации, требовавшей знания законов аэродинамики, успешное развитие которой было обязано работам русского механика *Н. Е. Жуковского* (1847—1921).

Сын инженера путей сообщения, Н. Е. Жуковский провел детство в селе Орехово, бывшей Владимирской губернии, в которое он не раз возвращался и позднее. По окончании средней школы он поступил в Московский университет. Еще в университете любимыми предметами Н. Е. Жуковского были физика и механика. Особенное его внимание привлекала динамика жидкостей и газов.

Первая научная работа Жуковского была посвящена механике жидкости. Она была представлена им в 1876 г. в качестве диссертации на степень магистра прикладной математики. Через шесть лет Жуковский защитил диссертацию на тему «О прочности движения» на степень доктора прикладной математики, а в 1886 г. был приглашен на кафедру механики в Московский университет.

В дальнейшем Жуковский написал ряд работ по механике, из числа которых его труд «О движении твердого тела, имеющего полости, наполненные однородной капельной жидкостью» по своему значению может быть поставлен в одном ряду с выдающимися работами Гельмгольца и других крупнейших механиков XIX в.

В этой работе Жуковский доказал, что «если в теле имеется какая-нибудь полость, наполненная трущейся жидкостью, и такой системе сообщены какие-нибудь начальные скорости, то движение ее будет стремиться к предельному состоянию, при котором одна из главных осей инерции рассматриваемых масс займет направление главного момента начальных количеств движения, и вся система будет вращаться около нее как одно неизменяемое тело с постоянной угловой скоростью»[1].

Одновременно с исследованиями по теоретической механике Жуковский широко развернул экспериментальные работы в лаборатории Московского высшего технического училища. Его исследования были тесно связаны с развитием техники в России. Они касались теории регулирования машин и других практических задач техники.

В 1897—1898 гг. Жуковский производил опыты над ударами воды в водопроводных трубах в связи с постройкой московского водопровода (рис. 51). Он выяснил, что «все явления при гидравлическом ударе объясняются возникновением и распространением в трубах ударной волны, происходящей от сжатия воды и от расширения стенок трубы...» и что «...при весьма быстром закрытии задвижки вода останавливается, и давление повышается только при задвижке, и это состояние воды передается по трубе по закону распространения волнообразного движения»[2].

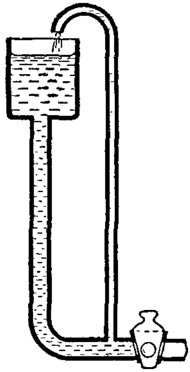

Рис. 51. Осуществление гидравлического удара на опыте.

Жуковский нашел уравнения, описывающие это гидродинамическое явление, и указал, что конструкция задвижек (кранов) должна обеспечивать медленное постепенное закрытие труб, что избавит их от гидравлических ударов.

Наибольшее значение для механики и техники имели аэродинамические исследования Н. Е. Жуковского, давшие мощный толчок развитию авиации.

Экспериментальное изучение сопротивления воздуха и подъемной силы пластинки производилось Жуковским в лаборатории Московского университета. В 1892 г. он опубликовал первую работу по аэродинамике, в которой рассмотрел не только проблему планирования с сохранением высоты, но и определил условия подъема планирующего тела на высоту, бо́льшую начальной. В этой

---

[1] Н. Е. Жуковский, Сочинения, т. III, 1936, стр. 181.
[2] Там же, т. VII, 1936, стр. 58.

работе он указал также на возможность траектории самолета в виде «мертвой петли».

Теория вихрей и невихревого обтекания была хорошо разработана в гидродинамике во второй половине XIX в., но она не находила еще практического применения в технике. Как указывал Жуковский, уравнения гидродинамики имели приложение только к волнообразному движению жидкости, к теории планетных форм и к истечению из сосудов. Парадокс Эйлера—Даламбера (обтекание тел невихревым потоком идеальной жидкости) был едва ли не единственным известным тогда положением о взаимодействии жидкости и погруженного в нее тела при их относительном движении, к тому же не имевшим практического значения.

Н. Е. Жуковский первый показал, как важен учет циркуляционных потоков, возникающих при движении тела в жидкости и в воздухе. Он исследовал явление циркуляции воздуха вокруг движущейся в нем пластинки и возникающие вследствие внутреннего трения вихревые движения и доказал, что подъемная сила пластинки зависит не только от динамического давления встречного потока, но и от циркуляции воздуха вокруг нее.

Н. Е. Жуковский создал стройную теорию аэродинамики, но не довольствуясь получением лишь формально математических положений, он стремился уяснить их физическое значение.

В области гидродинамики и аэродинамики ученые столкнулись с такими физическими свойствами тел (вязкость, значительная сжимаемость, сложная зависимость между объемом, давлением и температурой жидкости и газа), без учета которых теории обтекания тел были лишь отвлеченными схемами.

Н. Е. Жуковский был одним из немногих ученых конца прошлого века, который обратил на это внимание. Он писал: «... Независимо от трудности интегрирования уравнений гидродинамики с соблюдением тех граничных условий, которые представляет практика, мы не можем без опыта сделать выбора между различными теоретически возможными течениями, которые могут образоваться около рассматриваемого тела... Только прямой и твердый опыт укажет теоретику, с какой задачей гидродинамики он имел дело и в каком смысле он должен рассматривать явление»[1].

Одна из главнейших задач, решенная Н. Е. Жуковским,— определение наивыгоднейшего профиля крыла самолета. Опыт показал, что крыло самолета не должно быть плоским (рис. 52). 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 крыла к встречному воздушному потоку измеряется относительно хорды, соединяющей две самые нижние точки профиля крыла.

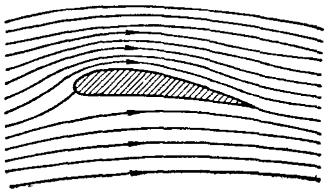

Рис. 52. Профиль крыла, данный Н. Е. Жуковским.

Крыло такой формы имеет то замечательное свойство, что подъемная сила, действующая на него, создается не только при угле наклона, большем нуля, но даже при небольших отрицательных углах (до —5°).

Подъемная сила крыла равна произведению плотности воздуха на скорость, которую имеет вдали от крыла обтекающий его профиль поток, и на циркуляцию скорости вокруг этого профиля. Для случая движения самолета скорость потока равна скорости полета.

Н. Е. Жуковский дал методы вычисления распределения скоростей вдоль профиля поперечного сечения крыла и определения возникающей вследствие этого подъемной силы. Для решения уравнений аэродинамики Жуковский применил простые графические способы. Данная им формула для определения подъемной силы крыла служит основой всех аэродинамических расчетов при проектировании самолетов.

Экспериментальные и теоретические исследования Н. Е. Жуковского положили начало развитию авиации в России. Широкое применение получили данные им

---

[1] Н. Е. Жуковский, О работах Д. И. Менделеева по сопротивлению жидкостей и воздухоплаванию, Сочинения, т. VII, 1950, стр. 250—251.

профили крыла, лопастей гребного винта или пропеллера и рулей.

Ко времени войны 1914—1918 гг. русские самолеты снабжались винтами, которые развивали вполне достаточную тягу, доказывая справедливость вихревой теории гребных винтов, созданной Н. Е. Жуковским.

Аэродинамика Жуковского была построена на данных наблюдения и эксперимента. «Нужен настоятельно,— писал Жуковский,— и будет решать дело разумный и твердый опыт, а молодое и неопытное умственное

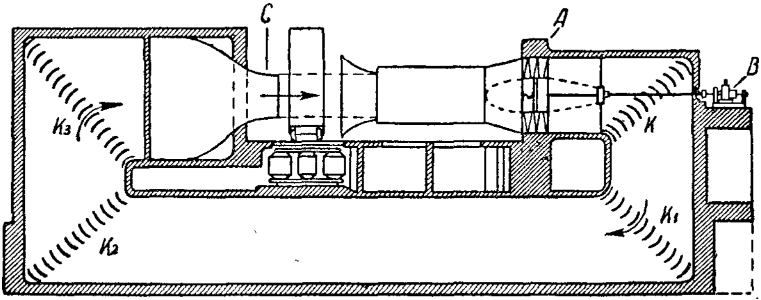

Рис. 53. Аэродинамическая труба.

построение пойдет на поводу в ту или другую сторону, пока приученное опытом к верной дороге самое не станет вести за собой всю сущность опытного знания» [1].

Аэродинамические теоремы Жуковский доказывал при помощи геометрических методов. «Если могут быть споры о самостоятельной роли геометрии при решении недоступных до сих пор задач динамики,— писал он,— то ее высокое значение в преподавании механики не подлежит сомнению».

Для проведения своих опытов Н. Е. Жуковский построил в 1902 г. первую в России и вторую в мире аэродинамическую трубу, в которой и производил испытание сопротивления пластин струе воздуха. По его указаниям была сделана установка для испытания пропеллеров до 5 *м* в диаметре.

Воздух в показанном на рисунке 53 разрезе аэродинамической трубы засасывается винтом *А*, вращаемым

[1] Н. Е. Жуковский, Сочинения, т. V, 1936, стр. 101.

мотором *B*, и движется (на рисунке) слева направо, меняя четыре раза свое направление. При этом он проходит через *системы параллельных каналов* k, k_1, k_2, k_3, уничтожающих возникающие в нем вихри, а сечение воздушного потока постепенно увеличивается. Из широкого сопла *C* он поступает в пространство, где производятся опыты, и далее снова засасывается винтом в трубу.

Эксперименты и теоретические исследования создали условия для успешного развития авиации, на что указывал Н. Е. Жуковский в своих статьях.

«Приближается то время, когда направляемая твердым опытом теоретическая мысль сделается хозяином в решении вопросов о сопротивлении жидкостей, когда аэропланы и дирижабли будут строиться с таким же верным расчетом, с каким теперь строятся пароходы и автомобили...» [1].

Значение работ Н. Е. Жуковского для развития авиационной техники было по достоинству оценено В. И. Лениным, который назвал Н. Е. Жуковского «отцом русской авиации».

Еще в 1918 г. был создан Центральный аэрогидродинамический институт, председателем научной коллегии которого был назначен Жуковский. Н. Е. Жуковский наметил широкую программу дальнейших работ, но в марте 1921 г. он преждевременно скончался.

Трудно переоценить влияние исследований Н. Е. Жуковского на развитие авиационной техники. Он отверг ходячее мнение инженеров, будто бы «аэроплан не машина, его рассчитать нельзя», и дал точные методы для расчета подъемной силы, силы тяги, развиваемой гребным винтом, методы определения профилей крыла, лопасти пропеллера и рулей.

Исследования Н. Е. Жуковского были продолжены его учеником — замечательным русским математиком *С. А. Чаплыгиным* (1869—1942).

По окончании Московского университета в 1890 г. С. А. Чаплыгин был оставлен Н. Е. Жуковским при кафедре механики. В 1902 г. он защитил докторскую диссертацию «О газовых струях» и был приглашен на кафедру механики университета в качестве профессора.

---

[1] Н. Е. Жуковский, Новое в теории сопротивления жидкостей, Сочинения, т. IX, 1936, стр. 241.

После смерти Н. Е. Жуковского С. А. Чаплыгин был назначен председателем коллегии Центрального аэрогидродинамического института, лаборатории которого были реорганизованы под его руководством.

С. А. Чаплыгин очень много сил и времени посвятил решению проблемы полета при больших скоростях, приближающихся к скорости звука.

Если скорость движения тела в воздухе становится сравнимой со скоростью звука, то при расчетах воздух нельзя принимать за несжимаемый газ. Поэтому возникла проблема движения тел в сжимаемой газовой среде.

Эта проблема была разрешена Чаплыгиным в его работе «О газовых струях», законченной им еще в 1902 г., т. е. ранее, чем она практически возникла в авиации. В этой работе были даны методы учета влияния сжимаемости воздуха на сопротивление, встречаемое самолетом при его движении, на его подъемную силу и решение других задач аэромеханики.

Чаплыгин изучал различные профили крыла самолета и в работе «Результаты теоретических исследований о движении аэропланов» писал: «...Я исследовал некоторые формы крыльев, напоминающие крылья птиц, с непрерывными и мягкими обводами и лишь с одной точкой заострения. Простейшая форма этого рода получится, когда очертание сечения крыла представляет результат инверсии[1] параболы»[2]. Он установил, что такое крыло очень устойчиво, причем, чем оно толще, тем устойчивей.

В целях увеличения подъемной силы самолета С. А. Чаплыгин исследовал свойства крыла с волнистой нижней поверхностью и дал метод его расчета. Он рассмотрел также возможность устройства разрезного и составного крыла, доказав, что подъемная сила плоского

---

[1] Понятие об инверсии дает следующий пример: пусть имеем на линии, проведенной через центр O окружности радиуса r, точку M; найдем на этой же линии точку M_1, чтобы $OM \cdot OM_1 = r^2$. Такие точки называются сопряженными.

Если точка M описывает некоторую кривую, то для каждого положения ее можно найти сопряженную точку на кривой, описываемой точкой M_1. Кривая, описываемая точкой M, является инверсией кривой, описываемой точкой M_1.

[2] Я. Л. Геронимус, Очерки о работах корифеев русской механики, Гостехтеоретиздат, 1952, стр. 317.

разрезного крыла имеет ту же величину, как и при сдвинутых крыльях. Он также вычислил подъемную силу вогнутого разрезного крыла и доказал, что оно может дать даже большую подъемную силу, чем при сдвинутых крыльях.

Эти исследования позволили конструкторам создать так называемое «механизированное крыло» с предкрылком или закрылком, которые при нормальном полете прижаты к основному крылу, образуя один профиль; при взлете же или при посадке, когда скорость самолета мала и нужно увеличить подъемную силу, предкрылок или закрылок отодвигается от основного крыла.

В расчетах, связанных с решением вопросов авиации, подводного плавания и метеорологии, чаще приходится встречаться с турбулентным, а не ламинарным движением, и изучение его имеет важнейшее значение для решения многих научных и технических проблем.

Теоретические исследования движения жидкостей и газов позволили технике практически разрешить проблему авиации. Первым шагом было изучение парящего полета птиц. При парении птица не машет крыльями, а лишь меняет угол наклона их к горизонту. Она использует энергию восходящего воздушного тока. Парение — скользящий полет, при котором падающее в воздушном токе тело приобретает боковое поступательное движение. Если оно происходит в восходящем воздушном токе, то, снижаясь относительно окружающего воздуха, птица может оставаться на одной и той же высоте или даже подниматься относительно земной поверхности.

Первые планеры имели примитивную конструкцию, почти не отличаясь от воздушного змея. При взлете и посадке летчик бежал по поверхности Земли, опираясь локтями на планер. Управление планером осуществлялось перемещением его тела, изменявшим положение общего центра тяжести.

Современный планер представляет собой самолет без двигателя. Его крыло имеет каплеобразную форму, а корпус обтягивается полотном или фанерой с лакированной или полированной поверхностью. Корпус также имеет обтекаемую форму. В нем находится кабина, в которой летчик с помощью рычагов и педалей управляет полетом. В хвостовой части помещается стабилизатор и рули высоты и поворота. При разбеге, осуществляемом на буксире автомашины или самолета, планер катится или скользит на лыже.

В воздухе планер опускается скользящим полетом, набирая скорость. Увеличив при помощи руля угол наклона — угол атаки — к горизонту, можно снова подняться на некоторую высоту, но не бо́льшую той, с которой начался спуск. То снижаясь, то вновь поднимаясь, планер должен приблизиться к земной поверхности и сесть.

Попадая в восходящие токи воздуха, планер может набрать прежнюю и даже бо́льшую высоту. Маневрируя таким образом, он увеличивает свою потенциальную энергию и замедляет спуск на землю. Это планирование называется статическим. Оно не зависит от собственного движения планера относительно окружающей среды.

Можно набрать большую высоту и в горизонтальном токе воздуха, если только изменяется скорость потока. Предположим, что планер спускается скользящим полетом в том же направлении, в котором дует ветер. Теряя в высоте, он выигрывает в скорости и двигается быстрее ветра. Если увеличить угол атаки, то планер набирает высоту. При неизменной скорости ветра он не поднимется выше, чем был в начале спуска. Но если скорость ветра в этот момент уменьшится, то его скорость относительно окружающего воздуха станет больше. Поэтому планер может выиграть в высоте. Это — динамическое планирование.

Самолет движется вперед силой тяги, развиваемой его двигателем при вращении пропеллера. Эта сила численно равна произведению массы отбрасываемого пропеллером воздуха на его скорость. По третьему закону механики с такой же силой давит и воздух на движущееся крыло самолета.

Положим, что крыло наклонено под углом α к горизонту (рис. 54). Оно испытывает давление воздуха R, направленное перпендикулярно к плоскости крыла. Сила давления разлагается на силу сопротивления движению крыла X и подъемную силу Y (величина этих сил зависит от угла атаки α, а также от отношения ширины крыла к его длине).

Подъемная сила поддерживает «на весу» самолет, а сила сопротивления движению уравновешивается силой тяги, развиваемой двигателем.

Как показали опыты, при различной скорости самолета требуется разный профиль крыла. Конструкторы разработали разнообразные профили, применяемые для самолетов, развивающих скорость от 300 до 1500 и более километров в час.

Однако достичь скорость самолета, превышающую скорость распространения звука, оказалось довольно трудно. Уже при скорости $900 \frac{км}{час}$ самолет нередко переставал слушаться рулей. Наблюдалась также вибрация крыльев, рулей и даже всего корпуса самолета, которая прекращалась лишь при уменьшении скорости.

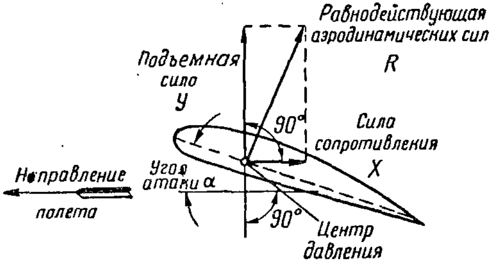

Рис. 54. Силы, действующие на крыло самолета.

Для устранения этих явлений, возникавших вследствие сопротивления воздуха, нужно было подняться в более высокие, разреженные слои атмосферы. Но поршневые двигатели были непригодны для работы в разреженном воздухе. Только применив принцип реактивного действия вытекающих газов, удалось создать двигатель, позволивший решить проблему полета в стратосфере.

По идее реактивный двигатель представляет собой сигарообразную сквозную камеру, куда насосом подается жидкое топливо (рис. 55). Распыляемый форсункой бензин или керосин сгорает и превращается в раскаленные газы. Необходимый для сгорания кислород вследствие быстрого движения самолета поступает через конусообразный канал — диффузор. Образовавшиеся в камере раскаленные газы вытекают с большой скоростью через сопло двигателя наружу, создавая реактивную силу тяги, равную массе вытекающих газов, помноженной на их скорость. Такой двигатель носит название прямоточного. Он хорошо работает и в сильно разреженном воздухе при условии быстрого движения самолета, позволяя летать на высоте 10—20 километров с большой скоростью.

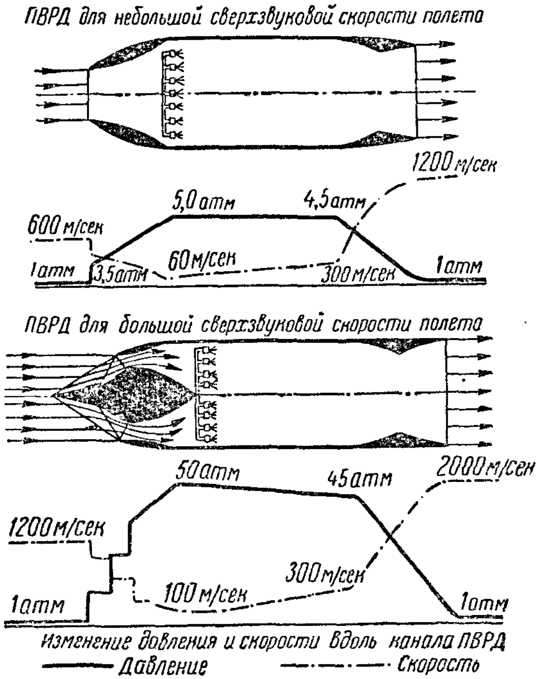

Рис. 55. Схемы прямоточных воздушно-реактивных двигателей.

Не имея вращающихся или движущихся частей, изнашивающихся вследствие трения, этот двигатель не требует частых ремонтов и более долговечен. Однако самолет с таким двигателем не в состоянии сам подняться в воздух. Он должен быть забуксирован другим самолетом, который сообщил бы ему необходимую скорость.

Устранить этот недостаток оказалось возможным, сжимая предварительно воздух в канале воздушно-реактивного двигателя компрессором.

Двигатель с компрессором, получивший название турбореактивного, позволяет современным самолетам достичь скорости до 2500 $\frac{км}{час}$.

Затруднения, возникающие при преодолении так называемого «звукового барьера», когда скорость самолета приближается к скорости звука, объясняются резким увеличением в этот момент сопротивления воздуха.

Дело в том, что, пока самолет летит со скоростью, меньшей звуковой, образующаяся перед ним «волна сжатия» успевает уйти вперед и не оказывает большого со-

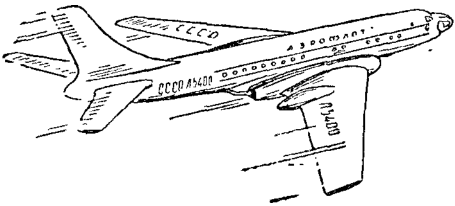

Рис. 56. Скоростной реактивный самолет.

противления его движению. Когда же самолет достигает скорости звука, «волна сжатия» уже не может обогнать его. У передних кромок крыльев и перед корпусом образуется слой сжатого воздуха, оказывающего очень большое сопротивление. В момент перехода через звуковую скорость самолет испытывает сильный толчок.

При дальнейшем увеличении скорости сопротивление воздуха уменьшается, так как самолет начинает обгонять образующуюся «волну сжатия» и как бы летит в невозмущенном воздухе.

Самолеты, предназначенные для полетов со сверхзвуковой скоростью, имеют заостренную переднюю часть корпуса и острые кромки крыльев. Кроме того, крыльям и хвостовому оперению придают стреловидную форму (рис. 56, 57). Поверхность корпуса и крыльев делают очень гладкой, без выступающих швов или заклепок.

Конструктивные изменения позволили сильно уменьшить сопротивление воздуха движению самолета и значительно ослабить вредное действие явлений, возникающих при переходе «звукового барьера».

Для поднятия самолета необходим более или менее длинный разбег, и изобретателей давно занимала проблема вертикального взлета. Для решения ее было необходимо изучить влияние формы лопастей воздушного

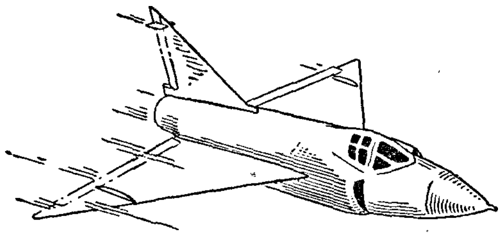

Рис. 57. Реактивный самолет с треугольным крылом.

винта на подъемную силу и условия устойчивости летательного аппарата в воздухе. Эти задачи были решены Н. Е. Жуковским вместе с *Б. Н. Юрьевым* (1889—1957),

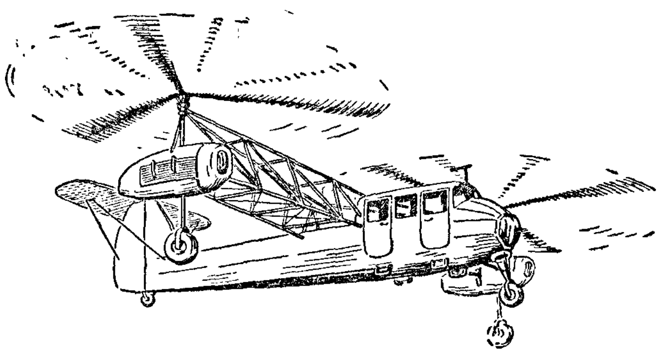

Рис. 58. Вертолет «Омега».

В. П. Ветчинкиным (1888—1950) и другими его учениками.

В настоящее время удалось создать мощный летательный аппарат — вертолет (геликоптер), могущий подняться вертикально с большим грузом и развить значительную поступательную скорость (рис. 58). Одним из затруднений, возникавших перед изобретателями и конструкторами вертолета, было уравновешивание возникающего реактивного вращающего момента, действующего на корпус аппарата.

Уравновешивание вращающего момента может быть достигнуто различными способами. В вертолете Б. Н. Юрьева и И. П. Братухина имеются два несущих

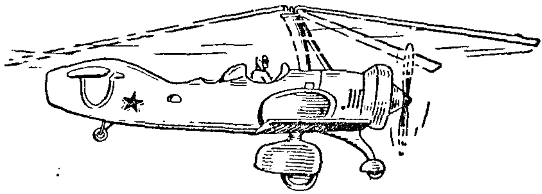

Рис. 59. Автожир Н. И. Камова.

воздушных винта, вращающихся во взаимно противоположных направлениях. Можно избежать вращения корпуса вертолета, снабдив хвостовую часть пропеллером, вращающий момент которого уравновешивает реактив-

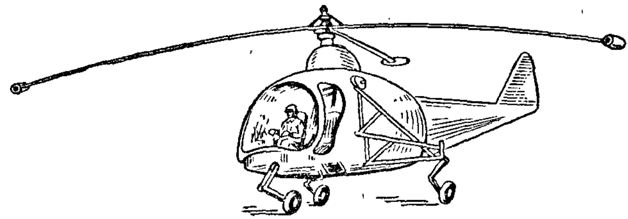

Рис. 60. Реактивный вертолет.

ный момент, возникающий вследствие вращения несущего воздушного винта. Очень остроумное решение проблемы дано *Н. И. Камовым* в его автожире, построенном в 1934 г. (рис. 59). У этого аппарата двигатель вращает пропеллер, а несущий винт получает движение под действием набегающего тока воздуха. Во время разбега начинает вращаться несущий винт и поднимает автожир на воздух, причем вращения корпуса не возникает.

Можно, наконец, избежать вращения корпуса, установив реактивные двигатели на концах лопастей несущего винта (рис. 60). Работа не связанных с корпусом вертолета двигателей не вызывает вращающего момента. Кроме того, значительно упрощается конструкция вертолета, так как в этом случае отсутствует сложная и тяжелая передача, приводящая во вращение несущий винт. Такой вертолет был построен и испытан в нашей стране еще в 1951 г.

При решении проблемы вертикального взлета практики опережали теоретиков. Однако без теоретических исследований Н. Е. Жуковского эта задача не могла бы быть успешно решена. Только совместная работа техников и механиков позволила создать современный вертолет.

27. МЕХАНИКА И ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ

Развитие в XIX в. машиностроения поставило перед прикладной механикой проблему передачи кинетической энергии от двигателя к рабочим станкам и машинам.

Передача движения осуществляется при помощи так называемых «кинематических пар» — призматической, в которой возможно лишь поступательное движение звеньев пары (например, ползун паровой машины), цилиндрической, с вращательным движением одного звена относительно другого (например, ось в муфте), и винтовой, состоящий из двух тел, осуществляющих как вращательное, так и поступательное движение относительно друг друга (винт в гайке). Это — элементарные кинематические пары. Но в машинах получили широкое применение и высшие кинематические пары с принудительным движением по эллипсу, циклоиде и другим кривым высшего порядка.

Соединение нескольких пар дает кинематическую цепь, простейшим примером которой может служить передача поступательного движения поршня в цилиндре паровой машины ее валу, состоящая из призматической и трех цилиндрических пар (рис. 61).

Наряду с проблемой передачи кинетической энергии возникла задача преобразования одного вида движения в другой, например криволинейного в прямолинейное. Первым из таких механизмов был «параллелограмм Уатта», изобретенный им в 1784 г. и примененный для преобразования прямолинейного движения штока поршня в колебательное круговое движение коромысла вертикальной паровой машины (рис. 62).

Подобных прямолинейно направляющих шарнирных механизмов было создано очень много. В машинострое-

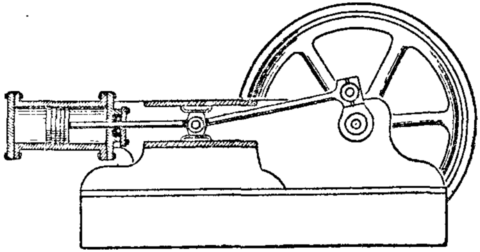

Рис. 61. Пример кинематической цепи.

нии их значение не велико, так как большое число шарниров приводит к быстрой их изнашиваемости, но в приборах и инструментах они используются широко.

Над усовершенствованием и изобретением шарнирных механизмов много работал русский математик П. Л. Чебышев (1821—1894).

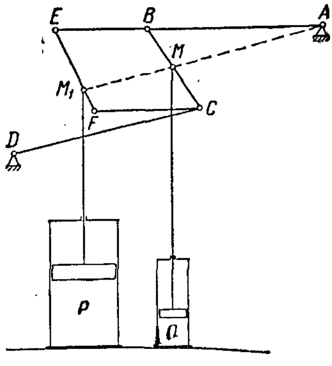

Рис. 62. Принцип устройства параллелограмма Уатта.

П. Л. Чебышев поступил в Московский университет шестнадцати лет и уже через год представил научную работу, за которую был награжден серебряной медалью. Двадцати лет он окончил университет, хотя средства для существования в эти годы он вынужден был зарабатывать сам.

Двадцатипяти лет Чебышев защитил магистерскую диссертацию, посвященную теории вероятностей, а через год был приглашен в Петербургский университет на кафедру математики. До преклонного возраста он читал лекции и только в конце жизни отдался полностью научным исследованиям. В возрасте 32 лет Чебышев уже был избран адъюнктом, через шесть лет — ординарным академиком, а в 1874 г,— членом Парижской академии наук.

Жизнь П. Л. Чебышева была непрерывным научным трудом. Он и умер, сидя за письменным столом. Главнейшие его труды относились к теории вероятностей, теории чисел и другим чисто математическим вопросам. Много сил и времени посвятил он теории шарнирных механизмов, зубчатых передач и решению других технических проблем.

В течение семидесяти пяти лет инженеры трудились над усовершенствованием «параллелограмма Уатта». Чебышев подошел к этой проблеме как математик, поставив перед собой теоретическую задачу — найти такую комбинацию соединенных шарнирами стержней, чтобы передаваемое ими движение как можно меньше отличалось от прямолинейного. К решению этой задачи он приложил чисто математическую теорию функций, и дал схемы ряда направляющих шарнирных механизмов, осуществляющих приближенно прямолинейное движение с желаемой степенью точности. Некоторые из этих механизмов применяются в различных приборах и в наше время.

Чебышев показал, что с помощью шарнирных соединений можно воспроизвести и вращательное движение, причем вращение может происходить вокруг двух различно направленных осей. Изучая траектории звеньев шарнирных связей, он нашел возможность воспроизвести и другие формы движения, необходимость в которых встречается при проектировании механизмов.

Механизмы, сконструированные Чебышевым, осуществляют также превращение непрерывного вращения кривошипа в движение по дуге круга с остановками. Один из его механизмов — «стопоходящая машина» — переступает, подобно животным. Другие механизмы воспроизводят движение весел в лодке. Эти идеи Чебышева получили широкое развитие в современной технике, например при создании «шагающего» экскаватора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

История механики свидетельствует о преемственности в развитии физических идей. Принципы механики не появлялись внезапно в сознании того или иного ученого. Они формулировались не сразу, а постепенно. Высказывания о сущности некоторых основных законов современной механики можно отыскать в трудах еще античных мыслителей и иногда в довольно отчетливой форме, как например «золотое правило» Герона.

Источником возникновения основных механических понятий был повседневный опыт, из которого и вытекали первоначальные представления о силе, массе, движении и других физических величинах.

Введением в механику основных физических понятий и принципов мы обязаны гениальности Архимеда, Стевина, Галилея, Ньютона. Знание логического пути, который привел их к этим понятиям, имеет важнейшее значение для пробуждения у изучающих механику исследовательского духа.

Преемственность играет важнейшую роль и в технике. Механики средних веков строили различные машины, заимствуя и развивая идеи античного времени. Статика Архимеда и Герона служила основным руководством для инженеров до середины XVI в., получив дальнейшее развитие в работах Стевина и Галилея.

П. Л. Чебышев, создавая конструкции механизмов, пользовался знанием законов рычага, изучавшихся Архимедом и Галилеем. Современный конструктор автоматических приборов также развивает идеи, заложенные в работах П. Л. Чебышева и других механиков прошлого века. Как бы ни был сложен и нов применяемый в наше время механизм или прибор, нетрудно установить сходство многих его деталей с механизмами и приспособлениями, применяемыми еще в древних и средних веках.

Не следует думать, будто проблемы, ставившиеся древними механиками, уже все разрешены в наше время. Достаточно вспомнить о сифоне. Действие этого прибора Герон объяснял сопротивлением разрыву водяной струи. Позднее это объяснение было отвергнуто и истечение воды из сифона приписывалось только разности давлений. Однако новейшие опыты показали, что струя в трубке сифона действительно оказывает значительное сопротивление разрыву, и точка зрения Герона приобретает большой интерес для современной механики.

Из изложенного очевидно огромное педагогическое значение ознакомления учащих и учащихся с основными фактами истории механики и происхождением механических принципов.

ЛИТЕРАТУРА

Античная философия (фрагменты и свидетельства), изд. Высшей партийной школы при ЦК КПСС, 1940.

Аристотель, Физика, Госиздат, 1937.

Архимед, О плавающих телах. Сб. «Начала гидростатики», Гостехиздат, 1933.

Бернулли И., Избранные сочинения по механике, ОНТИ, 1937.

Берри А., Краткая история астрономии, Гостехтеоретиздат, 1946.

Бек Т., Очерки по истории машиностроения, ГТТИ, 1933.

Бобынин В. В., Очерки по истории развития физико-математических знаний в России, т. I и II, 1886.

Борн М., Теория относительности Эйнштейна и ее физические основы, ОНТИ, 1938.

Булгаков Б. В., Прикладная теория гироскопов, Гостехиздат, 1955.

Бэкон Ф., Новый органон, Соцэкгиз, 1936.

Вавилов С. И., Исаак Ньютон, изд. АН СССР, 1945.

Витрувий, Десять книг об архитектуре, изд. Академии архитектуры, 1936.

Галилей, Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению, изд. АН СССР, 1943.

Галилей, Диалог о двух главнейших системах мира — Птолемеевой и Коперниковой, Гостехиздат, 1948.

Галилей, Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и о тех, которые в ней движутся. Сб. «Начала гидростатики», Гостехтеоретиздат, 1933.

«Галилео Галилей». Сб. статей, изд. АН СССР, 1943.

Гельмгольц Г., О сохранении силы, Госиздат, 1922.

Геронимус Я. Л., Очерки о работах корифеев русской механики, Гостехтеоретиздат, 1952.

Гнеденко Б. В., Михаил Васильевич Остроградский. Сб. «Люди русской науки», Гостехтеоретиздат, 1948.

Гюйгенс Х., Три мемуара по механике, изд. АН СССР, 1951.

Даламбер Ж., Динамика, Гостехтеоретиздат, 1950.

Даннеман Ф., История естествознания, т. I, Медгиз, 1932; т. II, ОНТИ, 1936; т. III, ОНТИ, 1938.

Декарт Р., Рассуждение о методе, изд. АН СССР, 1953.

Декарт Р., Избранные произведения, Госполитиздат, 1950.

Дильс, Античная техника, ОНТИ, 1934,

Дюгем П., Физическая теория, ее цель и строение, изд. об-ва «Образование», 1910.

«Исаак Ньютон». Сб. статей к 300-летию со дня рождения, под ред. С. И. Вавилова, изд. АН СССР, 1943.

Каган В. Ф., Архимед, Гостехтеоретиздат, 1951.

Кирпичев В. Л., Беседы о механике, Техтеоретиздат, 1950.

Клеро, Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики, изд. АН СССР, 1947.

Кориолис Г., Математическая теория явлений бильярдной игры, Гостехтеоретиздат, 1956.

Космодемьянский А. А., Очерки по истории теоретической механики в России, «Ученые записки Моск. гос. университета», т. II, вып. 122, 1948.

Космодемьянский А. А., Николай Егорович Жуковский, Сб. «Люди русской науки», Гостехтеоретиздат, 1948.

Крылов А. Н., Галилей, как основатель механики. Сб. «Галилео Галилей», изд. АН СССР, 1943.

Кудрявцев П. С., История физики, т. I—II, Учпедгиз, 1956.

Кудрявцев П. С., Исаак Ньютон, Учпедгиз, 1943.

Кузнецов Б. Г., Очерки по историй русской науки, изд. АН СССР, 1940.

Лагранж Ж., Аналитическая механика, т. I и II, Гостехиздат, 1950.

Лакур П. и Аппель Я., Историческая физика, изд. Матезис, т. I—II, Одесса, 1908.

Ландау Л. и Лифшиц Е., Теория поля, Гостехиздат, 1948.

Лауэ М., История физики, Гостехиздат, 1956.

Лурье С. Я., Архимед, изд. АН СССР, 1945.

Лурье С. Я., Очерки по истории античной науки, изд. АН СССР, 1947.

Лурье С. Я. и др., Очерки по истории древнего Востока, изд. АН СССР, 1940.

Любимов Н. А., История физики, ч. I, 1892; ч. II, 1894; ч. III, 1896.

Максвелл К., Материя и движение, Госиздат, 1924.

Маркс К., Капитал, т. I, Госполитиздат, 1928.

Мах Э., Механика, изд. т-ва «Общественная польза», 1909.

Мах Э., Принцип сохранения работы, Спб, 1909.

«Механика в СССР за 30 лет». Сб. статей под ред. В. З. Власова, В. В. Голубева и Н. Д. Моисеева, Гостехтеоретиздат, 1950.

Мещерский Н. В., Работы по механике переменной массы, Гостехтеоретиздат, 1949.

Николаи Е. Л., Теория гироскопов, Гостехтеоретиздат, 1948.

«Николай Коперник». Сб. к 400-летию со дня смерти, изд. АН СССР, 1947.

Нилус А. А., История материальной части артиллерии, Спб., 1904.

Ньютон И., Математические начала натуральной философии, пер. акад. А. Н. Крылова, изд. АН СССР, 1936.

Ольшки Л., История научной литературы на новых языках, т. I—III, Гостехтеоретиздат, 1933.

Орлов И., Классическая физика и релятивизм. Сб. статей «Теория относительности и материализм», Госиздат, 1925.

Остроградский М. В., Лекции по аналитической механике, Сочинения, т. I, 1940.

«Очерки по истории физики в России». Сб. статей под ред. А. К. Тимирязева, Учпедгиз, 1949.

Паскаль Б., Трактат о равновесии жидкостей. Сб. «Начала гидростатики», Гостехтеоретиздат, 1933.

Райков Б. Е., Очерки по истории гелиоцентрического мировоззрения в России, изд. АН СССР, 1947.

Розенбергер Ф., История физики, т. I—III, ОНТИ, 1933—1937.

Слудский Ф. А., Механика будущего. Математический сборник, т. IX, 1878.

Спасский Б. И., История физики, т. I, изд. Моск. гос. университета, 1956.

Стевин, Начала гидростатики. Сб. «Начала гидростатики», Гостехтеоретиздат, 1933.

Уэвелль В., История индуктивных наук от древнейшего и до настоящего времени, т. I—III, изд. «Русская книжная торговля», 1867—1869.

Хайкин С. Э., Что такое силы инерции, Гостехтеоретиздат, 1939.

Хвольсон О. Д., Курс физики, Гостехтеоретиздат, т. I—V, 1923.

Цейтен, История математики в древности и средние века, ОНТИ, 1932.

Цейтен, История математики в XVI и XVII вв., ОНТИ, 1937.

Цейтлин З., Наука и гипотеза, Госиздат, 1926.

Эйлер Л., Основы динамики точки, ОНТИ, 1938.

Энгельс Ф., Диалектика природы, Госполитиздат, 1948.

Энгельс Ф., Анти-Дюринг, Госполитиздат, 1948.

«Эллинистическая техника». Сб. статей, изд. АН СССР, 1948.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Феофан Дмитриевич Бублейников,
Евгений Яковлевич Минченков

ОЧЕРК РАЗВИТИЯ
КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

Редактор *А. В. Чеботарева*
Обложка художника *В. И. Андрушкевича*
Художественный редактор *Б. Л. Николаев*
Технический редактор *Т. А. Щептева*
Корректор *М. В. Голубева*

Сдано в набор 3/IX 1960 г. Подписано
к печати 16/XII 1960 г. 84×108 1/32.
Печ. л. 14 (11,48) Уч.-изд. л. 11,61.
Тираж 12000 экз. А 12160. Заказ № 1722.
Цена без переплета 32 к.,
переплет 8 к.

Учпедгиз. Москва, 3-й проезд
Марьиной рощи, 41.

Типография № 4 УПП Ленсовнархоза.
Ленинград, Социалистическая, 14.