



## ГЛАВА 2

### МЕХАНИКА

Вначале была механика. Как уже было упомянуто, учение о равновесии, статика, уходит далеко в древность. Ее возникновение обусловлено практическим значением, которое имеют для преодоления тяжелой физической работы рычаг, винт, наклонная плоскость и полиспаст. Греки развивали такие понятия, как удельный вес и центр тяжести. Вычисление центра тяжести у тела заданной формы было излюбленной задачей греков, решение которой из-за отсутствия исчисления бесконечно малых требовало особой остроты мышления.

Эта статика достигла своего высшего развития в законе возможных перемещений: образуют произведения сил на пути, пройденные их точками приложения в направлении действия этих сил; движение не наступает, если сумма этих произведений (взятых с правильными знаками) дает в результате нуль. Силы измеряют при этом весами; здесь, таким образом, постоянно имеют дело с действиями тяжести. Частным случаем является закон рычага; другой пример — правило Архимеда, согласно которому на всякое твердое тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной жидкости. Века потребовались, чтобы приобрести к началу XVII века эти знания. Последний в ряду творцов статики — Симон Стевин (1548—1620), изучая равновесие тел на наклонной плоскости, благодаря гениальной интуиции неявным образом открыл разложение

силы на составляющие, т. е. закон параллелограмма сил.

Схоластика считала непререкаемой истиной рассуждения Аристотеля (384—322 до н. э.) по вопросам механики, но для зарождающейся науки XVI столетия они были только большим препятствием, которое надо было преодолеть, чтобы успешно двигаться вперед.

Галилео Галилей (1564—1642) обосновал динамику, т. е., собственно, учение о движении тел; Христиан Гюйгенс (1629—1695) продолжал развивать динамику, а Исаак Ньютон (1643—1727) придал ей определенную законченную форму (в честь Ньютона обычно называют динамику ньютоновской). Наблюдения Галилея над падением тел с наклонной башни в Пизе начались в 1589 г. В 1638 г. вышло его главное произведение по механике «Discorsi e Dimonstrazioni matematiche intorno a due nuove Scienze attenenti alla Mecanica e ai Movimento locali». «Philosophiae naturalis principia mathematica» Ньютона появились в 1687 г. Период создания динамики продолжался, таким образом, одно столетие.

Результат этого величественного творения человеческого духа содержится в двух законах. Первый закон утверждает, что произведение массы материальной точки на ее ускорение равно действующей на нее силе (ускорение и сила являются направленными величинами, векторами, и закон утверждает одинаковое направление для обоих). Вторым законом является закон равенства действия и противодействия: силы, с которыми две массы действуют друг на друга, равны по величине и противоположны по направлению.

Проанализируем формулировки обоих законов. Что такое ускорение — в основном уже объяснил Галилей, когда он простыми математическими средствами исследовал понятие изменяющейся скорости. Ньютон, который располагал созданным им самим и Готфридом Вильгельмом Лейбницем (1646—1716) исчислением бесконечно малых, мог облегчить себе задачу. Ускорение есть изменение скорости в единицу времени, про-

изводная скорости по времени и, следовательно, вторая производная по времени радиуса-вектора, проведенного из любого начала координат к материальной точке. Если известны результаты измерения координат и времени, то скорость и ускорение становятся также известными. Первый закон дает, следовательно, дифференциальное уравнение второго порядка для координат точки как функции времени; его интегрирование определяет путь и скорость, с которой этот путь будет пройден. Если нет никакой силы, ускорение равно нулю; движение происходит прямолинейно с постоянной скоростью, как этого требует закон инерции.

Второй закон показывает, что масса есть «инертная» масса. Если два тела получают взаимные ускорения, то последние по величине обратно пропорциональны их массам. При начальной скорости, равной нулю, скорости и пути, пройденные в одинаковые промежутки времени, также обратно пропорциональны массам. Геометрическое измерение пути позволяет, таким образом, отнести каждую массу к произвольно выбранной единице. Когда ускорения имеют противоположные направления, сумма из произведений массы на скорость остается неизменной; она равна нулю в частном случае, когда оба тела сначала были в покое. В связи с тем, что произведение массы на скорость называется импульсом, можно изложенные законы выразить в форме, принятой в настоящее время:

1) сила равна изменению импульса в единицу времени \*);

2) в системе, не подверженной внешним влияниям и состоящей из двух или произвольно большого количества масс, общий импульс является постоянной величиной (закон сохранения импульса).

В этих высказываниях в неявной форме заключается утверждение, что силы, с которыми два тела действуют друг на друга, не нарушаются третьим телом и что масса есть неизменяемое свойство тела.

---

\*) Уже Ньютон пользовался этой формулировкой.

Последнее утверждение принималось механикой с самого начала ее развития, так как взвешивания никогда не обнаруживали изменения массы. Одним из важнейших достижений химии, ставшей наукой в XVIII веке, было установление того, что при химических реакциях общая масса участников реакции остается постоянной. Заслуга установления этого положения принадлежит А. Лавуазье (1743—1794). Позднее, с 1895 по 1906 г., оно было подтверждено особо точными взвешиваниями Ганса Ландольта (1831—1910). В настоящее время мы рассматриваем постоянство массы только как приближение, конечно, совершенно достаточное для механики, химии и многих областей физики.

В опытах, на которых основывается динамика, силы измеряются взвешиванием — способом, применяющимся исстари до сих пор; если силы действовали не строго вертикально вниз, то применяли шнуры на роликах. Таким образом, понятие силы было экспериментально обосновано, и можно было думать, что оно освобождено от всякой таинственности. Но так последовательно не думали ни в XVII, ни в XVIII столетиях. Само значение слова «сила» не было вполне установлено, и нагромождались заблуждение за заблуждением. Поскольку каждому сознательному применению человеком силы предшествует волевой акт, то позади физического понятия силы искали нечто более глубокое, метафизическое, какое-то присущее телам стремление; в случае, например, силы тяжести — стремление соединиться с себе подобным. Нам теперь трудно понять эту точку зрения. Насколько она была тогда распространена даже среди выдающихся умов, показывает спор между картезианцами, с одной стороны, и Лейбницем с его последователями, с другой стороны, о «мере силы, соответствующей природе». Одни считали такой мерой количество движения, порожденное силой в определенный момент времени, другие — то, что теперь называют кинетической энергией, а раньше называлось «живой силой». Ньютон не смог в этом вопросе

\* Картезианцы спорили с Ньютоном и с

занять ясной позиции. Уже Даламбер (1717—1783) охарактеризовал бесконечную дискуссию, которая велась по этому поводу, как словесный спор. Но понятие силы для многих оставалось мистическим до тех пор, пока в 1874 г. Г. Р. Кирхгоф (1824—1887) не сказал решающего слова в первом предложении своих «Лекций по механике»: «Механика есть наука о движении; мы считаем ее задачей: описать наиболее полно и просто происходящие в природе движения». Согласно этому вектор, изображающий силу, считают функцией положения материальной точки или времени или обоих вместе. Скорость может быть также включена в определение силы, как это имеет место, например, для сил трения. Поэтому интегрирование ньютоновского уравнения движения является чисто математической задачей, разрешение которой дает ответ на любой обоснованный вопрос о движении. Больше физика ничего не может сделать и ничего больше здесь нельзя от нее требовать. Если читатель поймет слово «описание» как причинное объяснение, то надо ему сказать: объяснение явления природы может состоять только в том, чтобы поставить его в связь с другими явлениями природы посредством известных законов, в результате чего комплекс связанных явлений описывается как целое. Этот взгляд не только проводится в механике, но является в наше время всеобщим.

---

В период времени от Галилея до Ньютона существовала еще вторая важная линия развития. Евангелиста Торричелли (1608—1647) под влиянием опыта Галилея с всасывающим насосом изобрел в 1643 г. ртутный барометр. Блэз Паскаль (1623—1662) побудил своего зятя Перье сравнить показания барометра на Пюи де Дом и в Клермоне (различие в высоте над уровнем моря примерно 1000 м). Отто Герике (1602—1686) изобрел воздушный насос и объяснил на основе многих очень внушительных опытов природу атмосфер-

ного давления \*). Во Введении уже было сказано, что в 1662 г. был известен закон Бойля—Мариотта относительно связи давления и объема воздуха. Другие газы \*\*) не были тогда в распоряжении исследователей; лишь в 1766 г. Генри Кавендиш (1731—1810) открыл кислород, а в 1772 г. Даниил Резерфорд (1749—1819) — азот. Современник Паскаля Роберт Гук (1635—1703) в 1676 г. показал на простых примерах пропорциональность между деформацией и упругостью у твердых тел. Так к 1700 г. был заложен физический фундамент, на котором в следующие полтора столетия было воздвигнуто величественное здание механики. Характерная для механики точность связана с тем, что она развивалась преимущественно силами математиков. В XVIII столетии здесь преобладали французы. Действительно, ньютоновские идеи распространились прежде всего во Франции, не только среди специалистов, но в значительно более широких слоях. Этому способствовал особенно Вольтер. Здесь мы имеем хороший пример влияния физики на общее духовное развитие и поэтому также на политику.

Наиболее выдающимися математиками были: Даниил Бернулли (1700—1782) и Леонард Эйлер (1707—1783), которые занимались системами многих материальных точек, твердыми телами и гидродинамикой; Жан Даламбер (1717—1783) — автор названного по его имени принципа, заменяющего уравнения движения; Жозеф Луи Лагранж (1736—1813), придавший этим дифференциальным уравнениям особенно удобную форму для сложных случаев; Пьер Симон Лаплас (1749—1827), который опубликовал в 1800 г. пятитом-

---

\*) «Магдебургские полушария» демонстрировались в 1656 г. Но лишь в 1663 г. Герике написал резюмирующее сообщение о своих опытах, которое появилось в 1672 г. под названием «Новые магдебургские опыты над пустым пространством».

\*\*) Слово «газ» встречается в 1640 г. у голландского химика и врача Гельмонта. Повидимому, в основе его лежит употребленное Парацельсом (1493—1541) слово «хаос» для «смеси воздуха».

ную «Небесную механику», содержащую гораздо больше, чем обещает название, между прочим, теорию волн в жидкости и теорию капиллярности. Так наступил блестящий расцвет аналитической механики. Дальше надо упомянуть Луи Пуансо (1777—1859), который развил механику твердого тела; Гаспара Гюстава Кориолиса (1792—1843), изучавшего влияние вращения Земли на происходящие на ней механические явления; Огюстена Луи Коши (1789—1857), давшего в 1822 г. наиболее общую математическую формулировку важных понятий деформации и упругого напряжения; исходя из закона Гука, он математически развил механику деформируемых тел, придав ей законченную форму. Вильям Роуэн Гамильтон (1805—1865) установил принцип наименьшего действия, к которому мы еще вернемся. Карл Густав Якоб Якоби (1804—1851) нашел метод исследования движения системы многих тел с помощью дифференциального уравнения Гамильтона—Якоби. Эту эпоху можно считать в основном законченной после исследований Жана Леона Пуазейля (1799—1869) о внутреннем трении в жидкостях и газах (1846—1847) и установления Гельмгольцем законов вихревого движения. Однако вплоть до современности над динамикой вязких жидкостей и газов продолжали работать выдающиеся исследователи, например, Рэлей (1842—1919), Осборн Рейнольдс (1842—1912) и Л. Прандтль; их целью было прежде всего создание водного и воздушного транспорта. В этих работах существенную роль играет различие между упорядоченными («ламинарными») и неупорядоченными («турбулентными») потоками. Если в настоящее время ограничиваются только экспериментами, иногда требующими больших средств, то это происходит потому, что еще не разрешены соответствующие проблемы, поставленные перед современной математикой. Но никто не ожидал при этом результатов, которые выходили бы за пределы основ ньютоновской механики.

---

Мы остановимся здесь только на двух результатах развития механики после Ньютона.

Со времен Эйлера математики установили вариационные принципы, которые были равноценны уравнениям движения, можно даже сказать — содержали их в себе. Пьер Луи Моро де Мопертюи (1698—1759) с большой страстностью провозгласил подобный принцип, названный по его имени, но лишь Лагранж дал ему правильное толкование. Известнее всего принцип наименьшего действия Гамильтона, который в 1886 г. Герман Гельмгольц распространил на ряд немеханических явлений. Макс Планк (1858—1947) видел в нем наиболее общий закон природы. Этот принцип заключается в том, что интеграл по времени, взятый от разности кинетической и потенциальной энергии между двумя определенными моментами времени, для действительного движения является минимальным по сравнению с любым другим мыслимым движением, которое вело бы от того же начального к тому же конечному состоянию. Когда такого рода принципы выдвигались в XVIII столетии, то они производили большую сенсацию. В самом деле, дифференциальные уравнения движения определяют явление в определенный момент времени из непосредственно предшествовавшего движения, как это соответствует причинному воззрению на природу. В этих принципах, напротив, все движение за конечный промежуток времени рассматривается так, как будто будущее определяет настоящее. Казалось, что в физику вошел телеологический момент, и мечтательные умы думали даже, что они смогут узреть здесь творца с его мировым планом, согласно которому фигурирующие в этих принципах величины должны иметь минимальное значение. Идея Лейбница о «лучшем из всех возможных миров» в некоторой мере согласовалась с этой фантазией.

Но в основе здесь лежало математическое заблуждение. Впоследствии научная критика установила, что хотя эти величины для действительного движения имеют экстремальное значение, однако оно не обяза-



тельно является минимальным. Вскоре увидели также, что можно применить вариационные принципы и к другим дифференциальным уравнениям, а не только к уравнениям механики. Тем самым принцип наименьшего действия и ему подобные были поставлены на соответствующее им место очень ценных математических вспомогательных средств.

Вторым гораздо более важным пунктом, который мы хотим упомянуть, является закон сохранения энергии, который уже внутри механики имел свою историю, прежде чем вышел из ее рамок и был сформулирован в виде универсального закона. Мы отложим его детальное рассмотрение до главы 8.

---

В. Р. Гамильтон, который играл важную роль также в геометрической оптике, указал на математическую аналогию между этой дисциплиной и механикой. Лучи света и траектории материальной точки соответствуют друг другу настолько хорошо, что возможно объединить траектории всех материальных точек, выходящих с одинаковыми скоростями из одной и той же точки, в одном «фокусе» и тем самым механически получить «оптическое» изображение. Это, однако, оставалось невыполненным до тех пор, пока не были открыты электроны — частицы, у которых электрические силы значительно превосходят силу тяжести. Современный электронный микроскоп, по крайней мере его электростатический вариант \*), есть осуществление мысли Гамильтона.

---

Созданная Эйнштейном в 1905 г. теория относительности мало изменяет динамику материальной точки, как это показал М. Планк в 1906 г. (основополагающая работа Эйнштейна в этом пункте неправильна).

---

\*) Существует также магнитный электронный микроскоп, который основан на других принципах.

Одной из характерных черт этой теории является введение универсальной константы, скорости света, механическое значение которой прежде было неизвестно. Остается попрежнему в силе закон, устанавливающий равенство силы изменению импульса в единицу времени, а также закон сохранения импульса замкнутой системы. Как и прежде, отсюда вытекает закон сохранения энергии; изменяются только связи импульса и энергии со скоростью. Это изменение заметно также только для скоростей порядка скорости света; при этом импульс и энергия по мере приближения к этим скоростям возрастают бесконечно, так что никакое тело никогда не может достигнуть скорости света. Она — недостижимая высшая граница для скоростей любых частиц. При радиоактивном распаде известны скорости электронов, достигающие 99% скорости света и больше, но никогда в эксперименте не была обнаружена сверхсветовая скорость. Правильность релятивистской формулы для импульса доказали многочисленные измерения скорости быстрых электронов в период с 1906 по 1910 г. [Вальтер Кауфман (1871—1947), Альфред Генрих Бухерер (1863—1927), Шарль Эжен Гие (1866—1942) и С. Ратновский (1884—1945)].

Принципиально еще важнее изменение понятия массы, к которому приводит эта теория. Эйнштейн в 1905 г. доказал, что всякое увеличение внутренней энергии должно увеличивать массу, а именно на величину, которая получается делением энергии, измеренной механической мерой, на квадрат скорости света. Но эти изменения массы в силу большой величины скорости света ( $3 \cdot 10^{10}$  см/сек) незначительны для всех явлений, которые мы называем механическими, электрическими и термическими. Точно так же при химических реакциях с наибольшими тепловыми эффектами взвешивание не может доказать изменения общей массы реагирующих тел. Но в ядерной физике этот закон инертности энергии получает огромное значение (гл. 10).

---

Что дает классическая механика? Исключительно много. Она дает основы для всякой технической конструкции, поскольку последняя является механической, и тем самым глубоко проникает в обыденную жизнь; она находит применение в биологических науках, например как механика движения тела или механика слуха. Она содержит учение о деформации упругих твердых тел, о течении жидкостей, о возможных во всех подобных телах упругих колебаниях и волнах, т. е. содержит также физическую акустику. Она привела, например, к теории вынужденных колебаний, значение которой выходит далеко за пределы механики; механика является также основой для понимания электрических колебаний.

Механика описывает в совершенном согласии с опытом процессы движения звезд с массой  $10^{32}$ — $10^{33}$  г и движение ультрамикроскопических частиц с массой  $10^{-18}$  г; она сохраняет свое значение для части наших опытов, касающихся движения молекул, атомов и еще более мелких элементарных частиц (электрон и т. д.). Поэтому она стала основой кинетической теории газов и физической статистики Больцмана—Гиббса. Так механика превратилась в храм величественной архитектуры и поразительной красоты.

Замечательно то, что долгое время механика отождествлялась со всей физикой; цель физики усматривали в сведении всех явлений к механике. И даже после того, как в 1900 г. увидели, что электродинамика не сводится к механике, многие ошибочно считали механику наукой, стоящей над опытом подобно математике.

Еще более глубокое потрясение механика испытала, когда квантовая теория с 1900 г. все яснее определяла границы ее значимости. Но даже там, где квантовая теория вытесняет механику, она оставляет неизменными два закона: сохранение энергии и импульса.

Попутно упомянем еще об одном достижении, которое, хотя и имеет более внешний характер, все же имело для физики очень большое значение. 2 июня 1799 г. Законодательное собрание в Париже приняло килограмм за единицу массы, а метр — за единицу длины. Вместе с более старой единицей времени, секундой, эти единицы явились исходным пунктом для CGS-системы (система сантиметр — грамм — секунда), к которой современная физика приводит все механические, электрические и магнитные единицы.

---

Акустика образует ветвь механики, которая, однако, особенно сначала, развивалась довольно самостоятельно. Уже в древности знали, что чистые тона в противоположность шумам основаны на периодических колебаниях источника звука. Пифагор (570—496 до н. э.) знал, кроме того, может быть из египетских источников, что длины струн, которые настроены на гармонические интервалы — октавы, квинты и т. д., при прочих одинаковых условиях относятся между собой, как  $1 : 2$ ,  $2 : 3$  и т. д. Значение, которое пифагорейцы приписывали числам в своей философии, связано, несомненно, с глубоким впечатлением, которое на них произвело это открытие. Изобретатели органов, широко распространившихся в IX столетии н. э., знали соответствующее правило у органных труб. Но акустическая наука в явной форме еще не участвовала в развитии музыкального искусства в течение двух тысячелетий после Пифагора. Лишь Галилей дал также и здесь решающий толчок для дальнейшего. В упомянутых «Discorsi» 1638 г. он устанавливает частоту как физический коррелят ощущения высоты тона. Он характеризует относительную высоту двух звуков посредством отношения их частот и выводит зависимость частоты колебаний струны от длины, напряжения и массы. Он наблюдал возбуждение колебаний посредством резонанса и объяснил это явление; он также показал осо-

бенность стоячих волн на поверхности воды в сосудах, производя колебания посредством трения. Еще дальше пошел его бывший ученик Марен Мерсенн (1588—1648): ему удалось почти в то же время, а именно в 1636 г., дать первое абсолютное определение числа колебаний, измерить скорость звука в воздухе, а также открыть, что струна в большинстве случаев одновременно с основным тоном дает еще гармонические обертоны. Жозеф Совер (1653—1716) сделал те же наблюдения над органами трубами, изучил сущность биений, а также установил на струнах положение узлов и пучностей посредством еще теперь применяемого бумажного «наездника».

Отто Герике доказал экспериментально, что звук, в отличие от света, распространяется не в пустом пространстве. Зависимость скорости звука от сжимаемости и плотности воздуха определил Ньютон в своих «Принципах», хотя его формула была подтверждена опытом лишь тогда, когда в 1826 г. Лаплас заменил изотермическое сжатие адиабатическим. Математическая обработка механики в XVIII столетии была полезна также для акустики. Выдающийся экспериментатор Эрнст Фридрих Хладни (1756—1827) в 1802 г. противопоставил давно известным поперечным колебаниям струн и стержней продольные и крутильные колебания, сделал видимыми в своих «звуковых фигурах» узловые линии колеблющихся пластинок и измерил скорость звука не только в воздухе, но и в других газах. Проводимость звука жидкостями долгое время оспаривалась из-за мнимой их несжимаемости, несмотря на прямое наблюдение, сделанное в 1762 г. Вениамином Франклином (1706—1790). Но в 1827 г. Жан Даниэль Колладон (1802—1892) и Якоб Франц Штурм (1803—1855) дали убедительное доказательство распространения звука в воде, определив скорость звука в Женевском озере и найдя ее равной  $1,435 \cdot 10^5$  см/сек.

В дальнейшем в течение XIX столетия физическая акустика все больше превращалась в учение об упругих волнах. Из оптики в нее были введены идеи интерференции, диффракции и рассеяния на препятствиях. Принцип Допплера, возникший в 1842 г. как оптическая идея (гл. 6), нашел свое первое подтверждение в изменениях высоты тонов, которые воспринимаются, например, в момент, когда свистящий паровоз, пройдя мимо, начинает удаляться. Аналитический метод Фурье (гл. 7), созданный первоначально для решения проблемы теплопроводности, применялся с огромным успехом для изучения звуковых волн, тем более, что разложение любого периодического колебания на колебания синусоидальные соответствует непосредственной психологической реальности; как установил в 1843 г. Симон Ом (1787—1854), ухо может воспринять эти колебания в отдельности. Если же это не удастся из-за врожденной недостаточности или недостаточного упражнения, то эти синусоидальные колебания определяют тембр звучания в смеси тонов, как это подчеркнул Гельмгольц в своем «Учении о звуковых ощущениях» (1862).

Большие технические задачи встали перед акустикой после того, как в 1861 г. Филипп Рейс (1834—1874) и в 1875 г. Александр Грехем Белл (1847—1922) изобрели телефон, а в 1878 г. Давид Юз (1831—1900) существенно улучшил микрофон Рейса. После этого возникла возможность более совершенной передачи человеческих голосов и музыкальных звуков. Передача звука электрическими волнами, плод мировой войны 1914—1918 гг., значительно усилила роль этой новой области технического применения — электроакустики. К этой же области относится фонограф, изобретенный в 1877 г. Томасом Альва Эдисоном (1847—1931).

Во время той же войны Поль Ланжевен (1872—1946), используя пластинки пьезокварца, нашел способ получения в воде звуковых волн с числом колебаний

высокого порядка — 100 000 в секунду, следовательно, далеко за пределами слышимости. Этот «ультразвук» должен был служить для нахождения подводных лодок под морской поверхностью. Физика применила его впоследствии для изучения собственных колебаний твердых тел, для измерения скорости звука в газах и жидкостях в зависимости от числа колебаний и в других случаях. Известную роль он играет также в биологии.

