

Было бы грубой ошибкой рассуждать следующим образом. В нижнем положении (до удара) энергия системы равна кинетической энергии пули $\frac{1}{2} mV^2$. При поднятии маятника эта энергия переходит в потенциальную энергию $(M + m)gh$. Такой способ рассуждения приводит к ошибочной формуле

$$h = \frac{1}{2g} \frac{m}{M + m} V^2.$$

Так как в случае баллистического маятника $m \ll M$, то эта формула дает совершенно неправильное (завышенное во много раз) значение для высоты h . Только в другом предельном случае, когда $m \gg M$, обе формулы фактически совпадают, как это ясно и без всяких вычислений. Ошибка приведенного рассуждения состоит в том, что оно не учитывает потери механической энергии при ударе.

При практических вычислениях удобно выразить высоту h через угол отклонения маятника из положения равновесия α , который легче поддается измерению, чем высота h . Очевидно $h = l(1 - \cos \alpha) = 2l \sin^2(\alpha/2)$, где l — длина маятника. Пользуясь этим выражением, формулу (26.3) нетрудно привести к виду

$$V = 2 \frac{M + m}{m} \sqrt{gl} \sin \frac{\alpha}{2} \approx 2 \frac{M}{m} \sqrt{gl} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (26.4)$$

§ 27. Внутренняя энергия.

Общезначимый закон сохранения энергии

1. Потеря кинетической энергии без соответствующего увеличения потенциальной, о которой говорилось в предыдущем параграфе, происходит не только при неупругих ударах, но и во многих других процессах. Например, движения в замкнутой системе, где действуют силы трения, в конце концов прекращаются, так что запас кинетической энергии в системе уменьшается. Может происходить и потеря потенциальной энергии. Так, например, если растянуть пружину, перейдя при этом предел упругости, а затем предоставить ее самой себе, то она не возвращается в исходное состояние, в пружине сохраняется некоторое остаточное удлинение. При этом работа, которую в состоянии совершить растянутая пружина, меньше работы, затраченной на ее растяжение. Во всех подобных случаях наблюдаются потери механической энергии. Формальная макроскопическая механика объясняет эти потери тем, что энергия расходуется на работу против диссипативных сил, действующих в системе. Однако такое объяснение является чисто формальным и нефизическим, поскольку оно совсем не раскрывает физическую природу диссипативных сил.

2. Надо учесть, что всякий раз, когда наблюдается потеря механической энергии, в системе происходят какие-то внутренние изменения. Если, например, с помощью чувствительного термометра или термопары измерить температуру шаров до и после неупругого удара, то опыт покажет, что в результате удара шары немного нагрелись. То же самое происходит при трении и остаточной деформации. При продолжительном и интенсивном трении нагревание настолько сильное, что для его обнаружения не требуется никаких специальных приборов. Дикари добывали огонь трением одного куска дерева о другой. Если на ось мотора насадить диск из прочного картона (толщиной около 1 мм) и привести его в быстрое вращение, то можно перепилить деревянную доску, поднеся ее к краю этого вращаю-

щегося диска (картонная пила). Явление объясняется тем, что в месте контакта вращающегося картона с доской выделяется много тепла из-за трения. Дерево в этом месте сильно разогревается, обугливается и разрезается вращающимся диском. Картонный диск при этом не разрушается, так как он интенсивно охлаждается из-за быстрого вращения в окружающем воздухе. Разрез доски получается гладким и хорошо отполированным. Он имеет буроватую окраску из-за обугливания при трении. Решающую роль в этом опыте играет натяжение картона, возникающее при вращении и придающее ему твердость. Вращением доски вокруг картонного диска ее распилить нельзя.

Могут быть и более сложные явления, сопровождающие потери механической энергии. Примером может служить следующая демонстрация. На вал небольшой динамомашинки надет деревянный шкив, на который намотана длинная прочная нить. Нить перекинута через блок, укрепленный около потолка аудитории. К ее свободному концу подвешен груз в несколько килограммов. Вращая шкив, поднимают груз к потолку аудитории. Цепь динамомашинки может замыкаться через ключ на небольшую электрическую лампочку. Если отпустить шкив, не замыкая цепи лампочки, то динамомашинка не вырабатывает электрического тока. В этом случае груз падает ускоренно — потенциальная энергия груза переходит в кинетическую энергию. Если снова поднять груз и замкнуть цепь лампочки, когда он пройдет приблизительно половину пути до пола, то лампочка загорается, а движение груза и вращение динамомашинки заметно затормозятся. После этого груз медленно опускается до пола с постоянной скоростью, а лампочка горит постоянным накалом во все время падения груза. Потенциальная энергия груза непрерывно уменьшается. Однако она не пропадает бесследно: динамомашинка непрерывно вырабатывает электрический ток, выделяющий тепло в нити лампочки.

3. Макроскопическая механика учитывает только кинетическую энергию макроскопического движения тел и их макроскопических частей, а также их потенциальную энергию. Но она полностью отвлекается от внутреннего атомистического строения вещества. При ударе, трении и аналогичных процессах кинетическая энергия видимого движения тел не пропадает. Она только переходит в кинетическую энергию невидимого беспорядочного движения атомов и молекул вещества, а также в потенциальную энергию их взаимодействия. Эта часть энергии тела получила название *внутренней энергии*. Беспорядочное движение атомов и молекул воспринимается нашими органами чувств в виде *тепла*. Таково физическое объяснение кажущейся потери механической энергии при ударе, трении и пр.

Представление о теплоте как о беспорядочном движении атомов и молекул окончательно утвердилось во второй половине XIX века и составило эпоху в науке. Примерно тогда же в физике утвердился и взгляд на закон сохранения энергии как на *общезначительный закон*, не знающий никаких исключений. Согласно этому закону *энергия никогда не создается и не уничтожается, она может только переходить из одной формы в другую*. Однако необходимо расширить понятие энергии, введя *новые формы ее*: энергию электромагнитного поля, ядерную энергию и пр. При этом необходимо заметить, что дать окончательную классификацию различных видов энергии не представляется возможным. Это можно было бы сделать, если бы окончательно были установлены все законы при-

роды, и развитие науки, во всяком случае в ее основах, было бы окончательно завершено.

Деление энергии на кинетическую и потенциальную имеет смысл только в механике и не охватывает всех форм энергии. Кроме того, отнесение энергии к тому или иному виду часто зависит от точки зрения. Например, в макроскопической механике упругая энергия сжатого идеального газа считается потенциальной. Но с молекулярной точки зрения упругость газа объясняется тепловым движением его молекул. Поэтому с этой точки зрения ту же энергию следует считать кинетической.

4. Принцип сохранения энергии, наряду с громадными конкретными применениями к уже известным явлениям, дает руководящие указания и в неисследованных областях. Всякое кажущееся нарушение этого принципа указывает на существование новых явлений, не укладывающихся в рамки существующих научных концепций. Так было, например, при открытии *радиоактивности*. Так было и с открытием *нейтрино*. На опыте были обнаружены кажущиеся нарушения законов сохранения энергии и импульса в явлениях β -распада атомных ядер. Это обстоятельство вынудило Паули (1900—1958) ввести гипотезу, впоследствии подтвержденную экспериментально, что в β -распаде наряду с известными заряженными частицами (электронами и атомными ядрами) участвует еще неизвестная нейтральная частица, которая и была названа *нейтрино*. Эта частица и уносит недостающую энергию и импульс. Благодаря исключительно слабому взаимодействию с веществом она ускользает от наблюдения. (Позднее, когда было выяснено, что каждой частице соответствует античастица, оказалось, что в явлениях электронного β -распада участвует не нейтрино, а *антинейтрино*.)

Общезначимый принцип сохранения энергии охватывает, таким образом, не только явления, рассматриваемые в макроскопической механике, но и такие физические явления, к которым законы такой механики не применимы. Поэтому он не может быть выведен из уравнений макроскопической механики, а должен рассматриваться как *одно из наиболее широких обобщений опытных фактов*.

§ 28. Абсолютно упругий удар

1. Интересные превращения кинетической энергии в потенциальную и обратно наблюдаются при *абсолютно упругом ударе*. Так называется столкновение тел, в результате которого их внутренние энергии не меняются. В чистом виде такой случай при столкновении макроскопических тел не встречается. Но к нему можно подойти довольно близко. Это имеет место, например, при столкновениях бильярдных шаров из слоновой кости или подходящей пластмассы. При столкновениях атомных, ядерных или элементар-