

ГЛАВА III

РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

§ 18. Работа, энергия, мощность. Элемент и интеграл работы

Представление о работе, как и о силах, заимствовано из нашего повседневного опыта. Но в обыденной жизни мы вкладываем в слова «работа», «энергия», «сила» более широкий и менее определенный смысл, чем в физике. В физике между величинами силы, работы и энергии установлена связь:

Работу измеряют произведением силы, действующей на тело в направлении перемещения, на величину перемещения точки приложения силы.

Энергию измеряют работой, которую может произвести тело.

Силы и работа проявляются при преобразовании движения. С количественной стороны преобразование движения характеризуется импульсом силы и работой силы, а именно:

Изменение количества движения определяется, как было пояснено выше, импульсом силы, т. е. произведением силы на время действия силы.

Изменение энергии движения определяется работой силы, т. е. произведением силы на путь, пройденный в направлении силы.

Мощностью P называют отношение работы к тому промежутку времени, в течение которого она была произведена. Стало быть, если работа производится равномерно, т. е. в одинаковом количестве за равные промежутки времени, то мощность измеряется работой, произведенной за 1 сек. Когда сила, оставаясь постоянной, идет на преодоление сопротивления движению и когда в связи с этим скорость движения v тоже остается постоянной, то $P = \frac{A}{t} = \frac{F \cdot l}{t} = F \cdot v$.

Таким образом, при постоянстве силы произведение силы на время определяет количество движения, произведение силы на путь определяет энергию движения, а произведение силы на скорость определяет мощность движения ¹⁾.

¹⁾ Сопротивление воздуха движению самолета, сопротивление воды движению корабля оказываются пропорциональными квадрату скорости. Поэтому мощности самолетных и судовых двигателей при прочих одинаковых условиях должны быть пропорциональны кубу скорости. Если пароход при двигателе мощностью в 100 л. с. развивал скорость хода 15 км/час, то для повышения скорости хода до 30 км/час потребуется двигатель в 800 л. с.

В механике различают энергии кинетическую и потенциальную. Под *кинетической* энергией понимают энергию механического движения тела, измеряемую работой, которую тело способно произвести при затормаживании тела до полной остановки. Под *потенциальной* энергией понимают энергию скрытых форм движения, измеряемую работой, которую тело способно произвести, когда его перемещают без изменения скорости из одного положения в пространстве в другое положение (например, потенциальная энергия тяжести) или когда тело восстанавливает свою форму (потенциальная энергия упруго деформированного тела).

Каждая физическая форма движения характеризуется тем или иным видом энергии. Когда мы изучаем тепловое движение, то имеем дело с *внутренней* энергией. В учении об электричестве и магнетизме мы сталкиваемся с *электрической* энергией и с *магнитной* энергией.

Во времена Ньютона точного представления об энергии не существовало. Оно было установлено в середине прошлого столетия, когда опытным путем была доказана эквивалентность теплоты и работы, т. е. их взаимная превращаемость с сохранением неизменной пропорции между количеством затраченной работы и полученного тепла. В настоящее время представление об энергии является в физике основным, и физика в значительной своей части является учением о законах взаимопревращений различных видов энергии.

Энергия, так же как и масса, неуничтожаема и несоздаема. Этот закон сохранения энергии главенствует над всеми законами физики. Для обширного класса механических движений этот закон может быть выведен из законов Ньютона, но в своем всеобъемлющем смысле он принят физикой как независимый от законов Ньютона, установленный опытом принцип.

Процессы работы и теплопередачи следует рассматривать как формы передачи энергии от одного тела к другому.

Энергия представляет собой «запас» возможной, но еще не осуществившейся работы; в отличие от этого понятие работы связано с представлением о *процессе* перемещения точки приложения силы¹⁾. Когда какое-либо тело производит работу, то энергия этого тела уменьшается; при этом всегда существует какое-либо другое тело, на которое затрачивается (направлена) работа первого тела и энергия которого поэтому возрастает. «Работа — это изменение формы движения, рассматриваемое с его количественной стороны»²⁾.

¹⁾ Для вопросов, изучаемых механикой, вышеприведенное определение понятия энергии является достаточным. Однако, переходя от изучения механического движения к изучению других форм движения, определение понятия энергии, как указывает термодинамика, нужно расширить: энергия измеряется суммой работы и тепла, которые могут быть отданы телом: $U = A + Q$.

²⁾ Э н г е л ь с, Диалектика природы, 1949, стр. 70.

Затронутые здесь вопросы подробнее будут рассмотрены в главе, посвященной изложению термодинамики.

По приведенному выше определению, работа A , производимая силой F , направленной под углом α к перемещению, на пути l равна

$$A = F \cos \alpha \cdot l. \quad (1)$$

Сила, направленная перпендикулярно к перемещению ($\alpha = 90^\circ$, $\cos \alpha = 0$), не производит работы; с этой точки зрения разложение силы на тангенциальную и центростремительную составляющие приобретает особый физический смысл; действие центростремительной силы сказывается только в изменении направления движения, тогда как тангенциальная сила производит работу, что сказывается или в увеличении скорости движения, или же в преодолении сил сопротивления или трения.

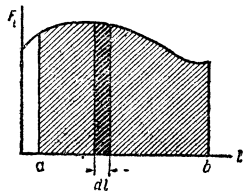


Рис. 27. Силовая диаграмма. Элемент работы — узкая, густо заштрихованная полоса; интеграл работы — вся заштрихованная площадь.

Работу постоянной силы, действующей в направлении перемещения или же под неизменным углом к перемещению, можно изобразить площадью прямоугольника, одной стороной которого является длина пути, а другой — величина проекции силы на путь. Если по мере перемещения точки приложения силы величина силы или угол, составляемый

силой с направлением перемещения, изменяются, то графически работу можно вычислить, как показано на рис. 27. Здесь по оси абсцисс отложена длина пути l , а по оси ординат — величина проекции силы F на направление перемещения. Для бесконечно малой длины пути dl элемент работы δA выражается, по определению, формулой

$$\delta A = F \cdot \cos(F, dl) \cdot dl, \quad (2)$$

или

$$\delta A = F_t \cdot dl.$$

На рис. 27 δA изобразится бесконечно узкой вертикальной полоской шириной dl и высотой F_t . Вся работа на пути l графически выразится площадью под кривой $F_t = f(l)$; на рисунке эта площадь заштрихована. Сумму бесконечно малых величин такого рода $\sum f(l) \cdot dl$ в анализе называют *интегралом*¹⁾ и обозначают знаком \int , заменяя

¹⁾ Понятие об интеграле устанавливается следующим образом. Предположим что нам даны функция $f(x)$ и два значения переменной x — a и b , и пусть $a < b$. Между a и b произвольно разместим $n - 1$ точек x_1, x_2, \dots, x_{n-1} получим последовательность точек

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b.$$

этим символом знак \sum . Поэтому аналитически работа переменной силы может быть выражена формулой

$$A = \int_a^b F_t \cdot dl. \quad (3)$$

Силу \mathbf{F} можно рассматривать как геометрическую сумму трех векторов, направленных по координатным осям. Алгебраические величины этих векторов (компоненты силы \mathbf{F}) обозначим через X , Y , Z . Следовательно, работа силы \mathbf{F} на перемещении $d\mathbf{s}$ должна быть равна сумме работ компонентов силы при том же перемещении $d\mathbf{s}$. Это позволяет применить для вычисления элемента работы наряду с формулой (2) еще такую формулу:

$$\delta A = X \cos(\mathbf{x}, d\mathbf{s}) \cdot d\mathbf{s} + Y \cos(\mathbf{y}, d\mathbf{s}) \cdot d\mathbf{s} + Z \cos(\mathbf{z}, d\mathbf{s}) \cdot d\mathbf{s}. \quad (4)$$

Здесь множители при компонентах силы представляют собой не что иное, как проекции элементарного перемещения $d\mathbf{s}$ на оси координат: $d\mathbf{s} \cdot \cos(\mathbf{x}, d\mathbf{s}) = dx$ и т. д. Следовательно,

$$\delta A = X dx + Y dy + Z dz. \quad (5)$$

Суммарная работа выразится интегралом

$$A = \int_a^b (X dx + Y dy + Z dz). \quad (6)$$

§ 19. Кинетическая энергия и потенциальная энергия

Кинетическая энергия тела измеряется работой, которую тело может произвести благодаря инерции при затормаживании тела до остановки. Вычислим эту работу.

Сила инерции, развиваемая движущимся телом при торможении, производит работу, идущую на преодоление сопротивлений движе-

В каждом из образовавшихся промежутков (x_{k-1}, x_k) выберем точку ξ_k и составим сумму $S = \sum_{k=1}^n f(\xi_k) (x_k - x_{k-1})$.

В анализе доказывается, что при некоторых предположениях, налагаемых на функцию $f(x)$, эти суммы стремятся к вполне определенному пределу если только длина наибольшего из частичных промежутков стремится к нулю, и что предел этот не зависит ни от того, как выбраны точки ξ_k в промежутках (x_{k-1}, x_k) , ни от того, каким образом мы разбиваем промежуток (a, b) на частичные промежутки. Этот предел называется определенным интегралом от a до b функции $f(x)$ и обозначается символом

$$\int_a^b f(x) dx.$$