

или

$$\left(\frac{\partial X_k}{\partial x_k}\right)_{P_{inv}} < 0. \quad (7.9)$$

Проиллюстрируем применение условий устойчивости для анализа физической реализуемости состояний системы на примере ван-дер-ваальсова газа.

Уравнение Ван-дер-Ваальса является уравнением третьей степени относительно объема. Это означает, что некоторым температурам и давлениям будут отвечать три значения объема, а некоторым — только одно (два других корня уравнения мнимые).

Изотерма Ван-дер-Ваальса в области температур ниже критической имеет характерную форму, изображенную на рис. 1. Не все состояния, отображенные этой кривой, физически реализуемы, а реализуемые не в одинаковой степени устойчивы.

Исследуем кривую с помощью критерия устойчивости. В нашем случае, применяя (7.9), получим

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T < 0. \quad (7.10)$$

Вся левая ветвь кривой до точки b и вся правая до точки z удовлетворяют условию (7.10). Но состояния, соответствующие отрезку кривой bz , не удовлетворяют условию (7.10). Эти состояния являются невозможными: с ростом объема растет и давление: $\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T > 0$, что противоречит условию устойчивости. И действительно, такие состояния физически не наблюдаются.

§ 8. Обобщение понятия работы

Механика — наука о наиболее простых физических явлениях зародилась и получила развитие ранее всех прочих физических теорий, изучающих более сложные явления. Поэтому совершенно естественно, что понятия, выработанные в свое время в механике, при последующем развитии науки распространялись на области более сложных физических явлений и обобщались.

Одним из важнейших понятий, которым оперирует механика, является понятие *механической работы*.

Если под действием внешней силы F материальное тело переместилось в направлении ее действия на отрезок dl , то произведение величины силы F на перемещение dl определяет элементарную работу силы F :

$$dA = Fdl. \quad (8.1)$$

Опыт показал, что работа обладает замечательным свойством *количественного* постоянства при любых качественных преобразованиях. Действительно, можно путем введения соответствующих преобразующих связей между системой и внешними телами преобразовать малое перемещение в большое, и наоборот (рычаг), криволинейное — в прямолинейное (ворот) и т. д., но при этом всегда наблюдается количественная неизменяемость работы.

По мере развития самой механики и охвата ею все более сложных механических движений происходит дальнейшее развитие и обобщение первоначально сложившихся понятий. Такое развитие и обобщение претерпевает и понятие работы.

Действительно, при вращательном движении элементарная работа может быть представлена как произведение момента сил на элементарное угловое перемещение

$$dA = M d\varphi. \quad (8.2)$$

В случае механической деформации, возникающей под действием равномерно распределенного давления в жидкости, газе, элементарная работа определяется как произведение давления на элементарное изменение объема

$$dA = p dV. \quad (8.3)$$

Таким образом, уже в рамках механики обнаруживается единообразие в построении выражений для элементарной работы.

Если первоначально понятие силы и перемещения (8.1) выступали как простые, исходные понятия, а понятие работы являлось понятием сложным, то по мере развития механики вырисовывается обратная картина: работа приобретает значение фундаментального понятия, а величины, ее определяющие, обобщаются и получают новый смысл.

Как вытекает из выражений (8.1)—(8.3), величина элементарной работы представлена в виде произведения двух величин, из которых первая количественно определяет движущую причину процесса (сила F , момент сил M , давление p), а вторая — количественную меру происходящего процесса (линейное смещение dl , угловое — $d\varphi$, изменение объема dV). Именно это обстоятельство позволило Лагранжу ввести в механике понятие обобщенной силы и обобщенной координаты.

Обобщенная сила — движущая сила процесса, а обобщенная координата — величина, изменение которой характеризует эффект процесса.

Если условиться обозначать обобщенную силу через X_k , а обобщенную координату через x_k , то можно обобщить выражения для элементарной работы и представить их в общем виде:

$$dA = X_k dx_k. \quad (8.4)$$

С развитием других разделов физики понятие работы было перенесено и в последние.

Как же осуществлялось дальнейшее обобщение понятия работы? Опыт показывает, что механические эффекты (макроскопические, наблюдаемые перемещения) могут сопутствовать явлениям немеханической природы. Действительно, известно движение заряженного тела в электрическом поле другого тела, движение проводника с током в магнитном поле, сокращение пленки под действием сил поверхностного натяжения и т. д.

Несомненно, что явления немеханической природы (например, электрические или магнитные) обладают множеством специфических особенностей, отличающих их от явлений механических. Следовательно, для их описания должны быть введены новые понятия, отличные от понятий механики (напряженность поля E или H , потенциал поля V и т. д.). Однако обнаруживается возможность связать эти новые понятия с понятиями механическими. Эта возможность обуславливается тем, что с рассматриваемыми явлениями связаны вполне определенные силовые поля, вызывающие эффекты механического перемещения.

В силу этого элементарная работа перемещения электрического заряда в электрическом поле может

быть представлена в виде

$$dA = -Vdq, \quad (8.5)$$

где V — потенциал электрического поля, а q — заряд. Аналогично этому работа сил поверхностного натяжения

$$dA = -\alpha dS, \quad (8.6)$$

где α — коэффициент поверхностного натяжения, а S — площадь поверхности раздела.

В выражениях (8.5) и (8.6) роль движущей причины — обобщенных сил X_k — играют потенциал электрического поля и коэффициент поверхностного натяжения, взятые с обратным знаком ($-V$ и $-\alpha$). Обобщенными координатами x_k являются заряд q и площадь S .

Таким образом, в тех случаях, когда физические явления связаны с наличием силовых полей, создается возможность представить выражение для элементарной работы в виде (8.4).

Возможность такого обобщения выражения для элементарной работы не является неожиданной. Действительно, существующая взаимосвязь самых разнообразных явлений природы заставляет думать о том, что должна существовать некоторая *общая мера количественных преобразований одного вида движения в другой*.

§ 9. Количественная мера воздействий.

Уравнение первого начала термодинамики

В предыдущем параграфе мы установили, что в том случае, когда явления немеханической природы сопровождаются механическими перемещениями в силовых полях, может быть построено единообразное выражение элементарной работы в виде (8.4).

Рассмотрим систему, подверженную различным воздействиям, которые связаны с наличием специфических силовых полей (механических, электрических, магнитных и т. д.). Пусть таких воздействий будет n ; это число определит число степеней свободы системы. Каждому воздействию отвечает своя обобщенная координата x_k и своя обобщенная сила X_k . Если в результате взаимодействия системы с окружающей средой произошло изменение всех координат x_k на величину dx_k , то была совершена элементарная работа

$$dA_k = X_k dx_k. \quad (9.1)$$