

§ 5. Опыт Джоуля. Внутренняя энергия идеального газа.

Важную роль в определении теплоемкости идеального газа при постоянном объеме и постоянном давлении сыграло утверждение о независимости внутренней энергии идеального газа с данной температурой от объема газа и, соответственно, от его давления. Данное утверждение следовало из формулы (4.6) для средней энергии теплового движения молекул газа, выведенной средствами статистической физики. Однако еще до того, как независимость энергии идеального газа от его объема была доказана статистической физикой, Джоуль установил этот факт опытным путем.

Опыт Джоуля интересен не только как пример постановки тонкого, остроумного и чрезвычайно убедительного эксперимента. Согласие полученного в нем результата с выводом статистической физики можно рассматривать и как, пусть косвенное и небольшое, но подтверждение принципов, лежащих в основе статистической физики.

Джоуль использовал стеклянный сосуд, имевший две камеры, соединенные трубкой, которая перекрывалась краном. Одна камера была наполнена газом, газ из другой камеры был откачен. Так подготовленная система помещалась в калориметр. После того, как в калориметре наступало равновесие (переставала меняться температура), кран открывался. Газ перераспределялся между камерами до выравнивания давления в них. При этом обнаруживалось лишь очень незначительное изменение температуры калориметра, которая измерялась с точностью до 0.01 градуса. Это означало, что практически не происходит обмена теплом между стеклянным сосудом с газом и калориметром. Если бы газ в сосуде был идеальным, то изменения температуры калориметра не наблюдалось бы вовсе.

Очевидно, что в опыте температура газа не изменилась, хотя занимаемый им объем увеличился. Поскольку объем всего стеклянного сосуда постоянен, то газ *не мог выполнить работу* над внешней средой и, наоборот, внешняя среда *не совершила работы* над газом. *Неизменность* температуры калориметра после открытия крана говорит *об отсутствии обмена* теплотой между газом и калориметром. Согласно первому началу термодинамики внутренняя энергия газа не изме-

нилась при увеличении занимаемого им объема. Поскольку неизменной осталась и температура газа, то **Джоуль заключил, что при данной температуре внутренняя энергия газа (идеального газа) не зависит от его объема**, а значит и давления.

Таким образом, внутренняя энергия U идеального газа является функцией только температуры:

$$U = U(T). \quad (5.1)$$

Полагая известной теплоемкость газа при постоянном объеме C_V , найдем явный вид зависимости его внутренней энергии от температуры при не слишком низких температурах (заметно выше температуры перехода в конденсированное состояние). Согласно (4.3) имеем

$$C_V = \frac{dU(T)}{dT}, \quad (5.2)$$

где символ частной производной при фиксированном объеме заменен символом полной производной, поскольку внутренняя энергия идеального газа не зависит от объема. В общем виде приращение внутренней энергии идеального газа при изменении его температуры от некоторого фиксированного значения T_0 до температуры T при постоянстве объема равно

$$U(T) - U(T_0) = \int_{T_0}^T C_V(T') dT'. \quad (5.3)$$

Штрихом под знаком интеграла в (5.3) помечена переменная интегрирования. На практике интерес, как правило, представляет изменение внутренней энергии при относительно небольших отклонениях температуры газа T от значения T_0 , в пределах которых теплоемкость C_V постоянна. При таких условиях из (5.3) найдем

$$U(T) = C_V T + W, \quad (5.4)$$

где не зависящая от температуры T постоянная W дается формальным соотношением

$$W = U(T_0) - C_V T_0. \quad (5.5)$$

Выражение (5.4) обычно имеется в виду, когда говорят о **внутренней энергии идеального газа**.

Постоянство внутренней энергии идеального газа при фиксированной температуре позволяет наиболее наглядно представить функцию термостата в процессах изменения состояния термодинамической системы.

Рассмотрим в качестве термодинамической системы идеальный газ из N молекул в цилиндре с подвижным поршнем. Пусть вся система находится в тепловом контакте с термостатом, поддерживающим в системе постоянную температуру T . Предоставим газу возможность квазистатически расширяться от начального объема V_1 до конечного объема V_2 . Перемещая поршень, газ совершит работу A . Привлекая в (2.10) уравнение состояния идеального газа (2.4), для работы A найдем

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = k_B N T \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = k_B N T \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (5.6)$$

За счет какого источника энергии совершена данная работа, если внутренняя энергия газа ввиду постоянства температуры в течение всего процесса оставалась неизменной? Ответ простой. Вся произведенная газом работа осуществлена за счет теплоты, поступившей в газ из термостата при расширении газа. Цилиндр с газом играет роль своего рода теплового насоса. Напротив, если изотермически сжимать газ, то вся произведенная над газом работа пойдет не на увеличение его внутренней энергии, а будет передана в виде теплоты термостату.

Мы видим, таким образом, что термостат может принимать весьма активное участие в процессах изменения состояния термодинамических систем.