§ 6. Адиабатические процессы в газах. Уравнение адиабаты

Квазистатический процесс, совершаемый теплоизолированной термодинамической системой, называется адиабатическим. Благодаря квазистатичности термодинамические параметры системы в каждой точке процесса удовлетворяют уравнению состояния системы. Теплоизолированность означает, что в энергетическом балансе участвуют только внутренняя энергия системы и совершаемая ей (или над ней) работа.

Рассмотрим процесс адиабатического сжатия или расширения **газа**, помещенного в цилиндр с теплоизолирующими стенками и поршнем. Если дать возможность газу адиабатически расширяться, то он произведет положительную работу A над некоторым внешним объектом. Поскольку приток тепла отсутствует, то работа может совершаться только за счет убыли внутренней энергии газа U и будет, следовательно, сопровождаться уменьшением температуры газа. При адиабатическом сжатии совершенная над газом работа целиком пойдет на увеличение его внутренней энергии, что будет проявляться в увеличении температуры газа.

Условие адиабатичности устанавливает, таким образом, дополнительную к уравнению состояния связь между термодинамическими параметрами термодинамической системы. Поэтому в адиабатическом процессе состояние системы однозначно определяется заданием одной переменной, например температуры. Остальные термодинамические величины будут функциями этой переменной. Чтобы установить функциональную связь между термодинамическими параметрами идеального газа в адиабатическом процессе или, как говорят на адиабате, необходимо составить и решить несложное дифференциальное уравнение.

Пусть в результате малого изменения состояния идеального газа при адиабатическом процессе ($\delta Q = 0$) температура газа изменилась на величину dT, а занимаемый газом объем изменился на величину dV. Из первого начала термодинамики в форме (3.5) и выражения (5.4) для внутренней энергии идеального газа следует

$$C_V dT + p dV = 0 . \tag{6.1}$$

Привлекая уравнение состояния $pV = N\,k_B T$, исключаем из уравнения (6.1) давление p. Результат запишем в виде

$$\frac{dT}{T} + \frac{k_B N}{C_V}\frac{dV}{V} = 0\ . \qquad (6.2)$$

Согласно (4.12) для идеального газа справедливо

$$k_B N = C_p - C_V\ .$$

Теплоемкости C_V и C_p считаем постоянными. Введем обозначение

$$\frac{C_p}{C_V} = \gamma \qquad (6.3)$$

С учетом (6.3), (6.4) из (6.2) следует

$$d\,\mathbf{ln}\,T + d\,\mathbf{ln}\,V^{\gamma-1} = d\,\mathbf{ln}\,TV^{\gamma-1} = 0\,. \qquad (6.4)$$

Равенство нулю дифференциала функции означает, что функция есть константа. Следовательно, на адиабате логарифм произведения $TV^{\gamma-1}$ сохраняет постоянное значение. Постоянное значение сохраняет, стало быть, и само это произведение. В итоге приходим к уравнению, связывающему на адиабате температуру и объем идеального газа:

$$TV^{\gamma-1} = const\,. \qquad (6.5)$$

Привлекая снова уравнение состояния идеального газа, можно записать уравнений его адиабаты еще в других, эквивалентных (6.5), формах:

$$pV^{\gamma} = const\,, \qquad (6.6)$$

$$\frac{T}{p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = const\,. \qquad (6.7)$$

Уравнение адиабаты (6.6) принято называть **формулой Пуассона**.

С помощью формулы Пуассона и формулы (5.4) для внутренней энергии идеального газа можно достаточно быстро находить работу, совершаемую газом при адиабатическом процессе. Пусть, например, в начальном состоянии газ имел температуру T_1 и занимал объем V_1. В результате адиабатического расширения объем газа стал равным V_2. Температура газа T_2 в конечном состоянии находится из (6.5) как

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1}. \tag{6.8}$$

Совершенная газом работа A равна уменьшению внутренней энергии газа U, которая является функцией только температуры. Используя соотношение (5.4), найдем

$$A = U(T_1) - U(T_2) = C_V T_1 \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]. \tag{6.9}$$