

ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКА

ВТОРОЕ НАЧАЛО

3.1. Понятие о компенсации и шесть простейших формулировок второго начала

Обратимся теперь к анализу второго начала термодинамики. Его содержание труднее определить сжатой формулировкой, чем содержание первого начала. Не представится возможным рассмотреть здесь все предложенные формулировки второго начала, — их слишком много. Я ограничу свою задачу разбором 18 важнейших формулировок. Простейшая из них такова: *невозможен процесс, имеющий единственным своим результатом превращение тепла в работу.*

Чтобы правильно понять эту или какую-либо другую формулировку второго начала, нужно иметь в виду, что сложность второго начала термодинамики связана с рассмотрением превращения одной формы перехода энергии в другую форму перехода энергии. Стало быть, анализируя второй принцип термодинамики, мы должны иметь в виду уже по меньшей мере три тела: первое, которое отдает энергию в форме тепла (теплоисточник); второе, которое получает энергию в форме тепла и отдает энергию в форме работы (назовем это второе тело рабочим телом); третье, которое получает энергию в форме работы от рабочего тела. Таким образом, схема процесса, о котором идет речь, во втором начале может быть графически изображена так, как показано на рис. 5.

Смысл приведенной формулировки второго начала термодинамики заключается в том, что невозможен процесс превращения тепла Q в работу A , если в итоге этого процесса состояние рабочего тела становится таким же, каковым было в начале процесса. Тем не менее, как известно, процесс превращения тепла в работу и в природе, и в технике происходит весьма часто. Было бы ошибочным сказать, что он имеет меньшую распространенность, чем процесс превращения работы в тепло. Напротив, превращение тепла в работу в природе встречается *столь же часто*, как и переход работы в теплоту. На поверхности земного шара ветры, дожди, реки, водопады производят непрерывно работу за счет теплоты, которую доставляет Солнце. Поэтому нельзя рассматривать процессы перехода работы в теплоту как правило, а процессы превращения тепла в работу как исключение. Выражаясь фигурально, природа имеет одинаковую склонность как к тем, так и к другим процессам. Но когда происходит преобразование работы в теплоту, дело может ограничиваться изменением термодинамического состояния одного лишь теплораспределителя

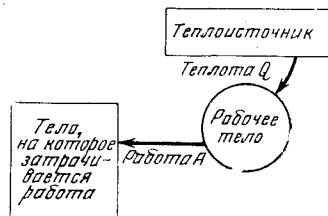


Рис. 5. Термодинамическая схема процесса, поясняющая одну из формулировок второго начала

щего тела (например, при нагревании путем трения); в противоположность этому всегда, когда происходит преобразование теплоты в работу, наряду с охлаждением теплоотдающего тела непременно происходит изменение термодинамического состояния еще одного или нескольких тел. В термодинамике это изменение термодинамического состояния рабочего тела или других привлекаемых к участию в процессе тел называется *компенсацией* превращения тепла в работу. Указанный термин позволяет выразить второе начало следующим утверждением (вторая формулировка): *невозможно превращение тепла в работу без компенсации*.

Мы вправе были бы различать компенсацию двух родов. Будем говорить, что происходит *компенсация первого рода*, если в итоге процесса, когда теплота Q превращается в работу A , имеет место изменение термодинамического состояния рабочего тела. Пример — изотермическое расширение газа. Если газ идеальный, то при изотермическом расширении его внутренняя энергия остается, как известно, без изменения и вся сообщаемая газу теплота нацело превращается в работу. Компенсацией этого превращения тепла в работу здесь является увеличение объема газа. Если бы, не меняя температуры, мы хотели вернуть объем газа к исходному значению, мы должны были бы затратить на сжатие газа работу в том же количестве, в котором работа была получена, причем обратно выделилась бы теплота Q . В итоге никакого превращения тепла в работу не происходило бы.

Для анализа работы тепловых машин всех конструкций (паровых — поршневых, паровых турбин, двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин) является более важной *компенсация второго рода*, когда превращение Q в A компенсируется изменением состояния каких-либо новых тел, а состояние рабочего тела эпизодически возвращается к исходному. В качестве таких «дополнительных» тел в тепловых машинах обычно служат *холодильники*.

Тепловые машины производят работу за счет расширения рабочего тела. Чтобы вернуть рабочее тело в первоначальное состояние, его надо сжать, а для этого надо затратить работу. Если бы мы стали сжимать рабочее тело при той же температуре, при которой оно расширялось, то на это потребовалось бы затратить всю ту работу, которая была получена при расширении, и в результате никакого перехода тепла в работу не произошло бы. Чтобы работа, необходимая на сжатие, оказалась меньше работы, полученной при расширении, необходимо, чтобы процесс сжатия, хотя бы в некоторой своей части, протекал при температуре более низкой. Значит, надо, сжимая рабочее тело, охлаждать его, т. е. надо, следовательно, вовлечь в процесс третье тело, служащее холодильником.

Таким образом, в случае компенсации второго рода только часть заимствованной у теплоисточника теплоты Q превращается в работу: $A = Q - Q_0$, другая часть (Q_0) переходит к холодильнику. Коэффициент полезного действия

$\eta = \frac{Q - Q_0}{Q}$ в связи с этим всегда оказывается меньшим единицы. На рис. 6 показана принципиальная термодинамическая схема тепловой машины.

Клаузиус формулировал второе начало следующим образом: *теплота не может переходить от холодного к теплему телу сама собой, даровым процессом*. В этой третьей формулировке главный смысл утверждения скрыт в словах «даровым процессом». Здесь под этим понятием имеется в виду процесс, не сопровождающийся компенсацией первого или второго рода.

Томсон-Кельвин формулировал второе начало так (четвертая формулировка): *невозможно превратить в работу теплоту какого-либо тела, не произведя никакого другого действия, кроме охлаждения*

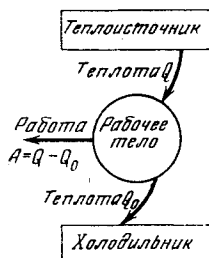


Рис. 6. Термодинамическая схема тепловой машины

этого тела Здесь также указывается на невозможность превращения тепла в работу без компенсации.

Оствальд предложил следующую (пятую) формулировку: *осуществление перпетуум-мобиле второго рода невозможно*. Вспомним, что двигатель, который был бы способен производить работу в количестве, большем по сравнению с тем количеством энергии, которое он поглощает извне, другими словами, двигатель, который сам бы рождал энергию, называется *перпетуум-мобиле первого рода*. Под *перпетуум-мобиле второго рода* подразумевают такой тепловой двигатель, который, повторяя произвольное число раз один и тот же процесс, был бы способен целиком превращать в работу все тепло, черпаемое им у какого-нибудь тела или тел, играющих роль источников тепла (не нуждаясь, таким образом, в других телах, служащих для «стока» теплоты, не превращенной в работу). Например, если бы можно было изобрести такую паровую машину, которая все тепло, заимствуемое у котла, полностью превращала бы в работу и не нуждалась бы, следовательно, ни в холодильнике, ни в каком-либо теле, заменяющем холодильник, то эта машина была бы перпетуум-мобиле второго рода (у паровых машин холодильником служит конденсатор или, в менее экономичных машинах, атмосферный воздух).

Обе эти машины с точки зрения нужд человека являются особо привлекательными. Будь построено перпетуум-мобиле первого рода, человечеству уже не надо было бы больше заботиться о топливе, химическая энергия которого преобразуется в двигателях внутреннего сгорания и в паровых машинах в энергию механическую, не надо было бы сооружать плотины на реках для гидросиловых установок. Будь построено перпетуум-мобиле второго рода, мы овладели бы неисчерпаемыми природными запасами внутренней энергии тел. Простой расчет показывает, что посредством перпетуум-мобиле второго рода мы могли бы, преобразуя заимствованную у воды океанов теплоту в работу, приводить в движение машины всех заводов, существующих во всех странах света, и только через 1700 лет заметили бы, что температура воды в океанах понизилась на одну сотую градуса.

Планк формулирует второе начало так (шестая формулировка): *невозможно построить периодически действующую машину, которая не производит ничего другого, кроме поднятия груза и охлаждения резервуара теплоты*. Это есть повторение формулировки Оствальда, в которой расшифрованы слова «перпетуум-мобиле второго рода».

3.2. Цикл Карно

Основатель термодинамики Сади Карно установил второе начало, изучая проблему возможного повышения коэффициента полезного действия тепловых машин.

По Карно, *наибольший коэффициент полезного действия тепловой машины не зависит от природы рабочего тела и вполне определяется предельными температурами, между которыми машина работает* (это в нашем обзоре — седьмая формулировка второго начала).

Приведенное утверждение можно рассматривать как следствие невозможности перпетуум-мобиле второго рода. Схема рассуждений такова. Вначале берем в качестве рабочего тела идеальный газ. Пользуясь уравнениями Клапейрона — Менделеева и Пуассона, подсчитываем коэффициент полезного действия тепловой машины, в которой идеальный газ в качестве рабочего тела совершает обратимый цикл, ограниченный двумя адиабатами и двумя изотермами (цикл Карно, рис. 7). Подсчет показывает, что коэффициент полезного действия равен разности температур теплоисточника и холодильника, деленной на абсолютную температуру теплоисточника. Выполним этот подсчет. Идеальный газ, содержащийся в цилиндре машины, расширяясь, выталкивает поршень и производит работу. При этом в первой изотермиче-