

## О ПЕРВОМ ЗАКОНЕ ТЕРМОДИНАМИКИ

А.Ф. КОНОВ

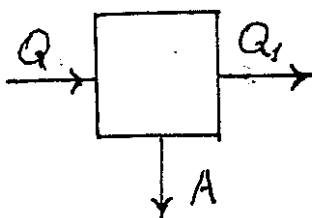
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

(ГУ ВНИИСХМ)

г. Обнинск.

Согласно первому закону термодинамики количество тепла сообщенного системе идет на приращение внутренней энергии системы и на совершение системой работы над внешними телами.

Схематически первый закон термодинамики изображен в виде рисунка[1]



Здесь  $Q$  – подведенная теплота;  $Q_1$  – отведенная теплота в среду с низкой температурой;  $A$  – работа тепловой машины над внешними телами.

Представленная схема не дает ответа на вопрос какое количество подведенного тепла преобразуется в работу, и какая часть тепла отводится в среду с низкой температурой. Какие законы определяют это разделение в замкнутом цикле тепловой машины.

Анализ цикла Майера приводит к заключению: тепло подведенное к системе, от среды с высокой температурой без изменения переносится в среду с низкой температурой, при этом в процессе переноса внешние силы производят работу равную подведенной теплоте.

Из первого закона термодинамики следует, что для замкнутого цикла сумма всего полученного тепла равна произведенной работе[2]. По существу это закон сохранения и превращения энергии. В математической форме этот закон записывается в следующем виде

$$Q_{1 \rightarrow 2} + Q_{2 \rightarrow 3} + Q_{3 \rightarrow 1} = A_{1 \rightarrow 2} + A_{2 \rightarrow 3} + A_{3 \rightarrow 1} \quad (1)$$

В формуле(1) слева равенства записана сумма теплот, а справа сумма работ.

Для цикла Майера выражение(1) записывается в следующей форме (см. рисунок)

$$Q_{3 \rightarrow 1} = A_{1 \rightarrow 2} + A_{2 \rightarrow 3} \quad (1')$$

Здесь  $Q_{3 \rightarrow 1}$  – подведенное тепло в изохорическом процессе;  $A_{1 \rightarrow 2}$  – работа изотермического расширения;  $A_{2 \rightarrow 3}$  – работа изобарического сжатия.

Если (1') выразить через параметры идеального газа, то получим выражение

$$3(P_1 - P_3)V_3 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + P_2(V_2 - V_3) \quad (2)$$

Уравнение(2) отражает закон сохранения и превращения энергии. Здесь левая часть подведенная теплота. А правая – работа, произведенная внешними силами в процессе переноса тепла от нагретого тела к холодному.

Отличие уравнения(1) от уравнения(2) заключается в том, что в уравнении(1) все подведенное тепло преобразуется в работу, а в уравнении(2) все подведенное тепло полностью переносится в среду с низкой температурой, при этом внешние силы производят работу равную подведенной теплоте.

Для того чтобы рассмотреть цикл Майера с точки зрения закона сохранения установим, что подвод тепла это первый и законченный процесс в котором строго определено подведенное тепло. Все следующие процессы рассматриваются как результат подведенного тепла.

Адиабатический цилиндр с теплоизолированным, невесомым, скользящим без трения поршнем, является вымышленным устройством, в котором исключаются неконтролируемый приток или утечка тепловой энергии в любом процессе цикла.

При описании цикла адиабатический цилиндр с идеальным газом представим как упругую пружину, шарнирно закрепленную одним концом к некоторой опоре. Пружина с закрепленным концом является частным случаем поля центральных сил. Центральное поле сил называется потенциальным, а силы консервативными. В механике утверждается, что работа консервативных сил на любом замкнутом пути равна нулю. Доказательства этого утверждения сводится к тому, что замкнутый путь разбивается на элементарные участки. На каждом участке консервативные силы совершают положительную и отрицательную работу, сумма которых равна нулю. При доказательстве рассматривается два примера перемещения тела в гравитационном поле и смещение свободного конца закрепленной пружины. При доказательстве не обращается внимание на то, что консервативные силы не могут выполнить какую-либо работу без внешних сил. Действительно, пусть штангист поднимает и опускает штангу с постоянной скоростью.

Здесь консервативная сила  $P = mg$ . Однако, работу выполняет не штанга. Штангист, прилагая силу, незначительно превышающую силу тяжести  $P$  выполняет работу  $A_m = 2P\Delta h$ . Точно также сжимая и восстанавливая пружину внешние силы совершают работу  $A_n = 2P\Delta h$ . Здесь  $P$  – внешняя сила,  $\Delta h$  - изменение длины пружины. При смещении поршня с постоянной скоростью в адиабатическом цилиндре внешние силы совершают  $A_{ц} = 2P\Delta V$ . Здесь  $\Delta V$  – изменение объема. Во всех случаях ни штанга, ни пружина, ни газ не совершают работу. Работу совершают внешние силы, изменяя положение штанги, пружины или поршня. Без внешних сил при любом давлении газа в цилиндре поршень переместится в положение, при котором рабочий объем цилиндра примет максимальное значение и в этом положении останется навсегда. Поэтому для того, чтобы заработало водяное колесо необходимо поднять уровень падающей воды выше

колеса, а для часов необходимо сжать пружину, при этом водяное колесо должно вращаться с постоянной скоростью, а маховик должен колебаться с постоянной частотой.

В отличие от подъема и спуска тела массой  $m$  в тепловой машине, подводимое тепло преобразуется в давление, которое затем с использованием внешних сил, преобразуется в работу. Давление газа может быть преобразовано в работу путем изменения объема при  $T = const$  или при  $P = const$  с изменением температуры и объема. В изотермическом сжатии работа, совершаемая внешними силами, равна

$$A_T = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1},$$

а при расширении работа внешних сил затрачивается на сдерживание свободного смещения поршня. В обоих процессах внешние силы при постоянной скорости смещения поршня производят одинаковую работу.

Физически подвод тепла в изохорическом или изобарическом процессе не вызывает сомнения. Однако в цикле Карно теплота подводится в изотермическом процессе, причем подводимая теплота тут же преобразуется в работу. В изотермическом процессе температура газа в цилиндре равна температуре нагревателя, причем в каждой точке изотермы это равенство сохраняется. Каким образом, в таком случае, тепло будет переходить от одного тела к другому при равных температурах этих тел. В действительности в изотермических процессах нет ни подвода, ни отвода тепла, изотермический процесс по определению происходит при  $T = const$ . Отсюда слова «сумма теплот» в первом законе термодинамики следует заменить словами «тепло подведенное в изохорическом процессе».

Для экспериментального доказательства этого вывода необходимо обратиться к первому опыту Джоуля по свободному расширению газа в пустое пространство. В этом опыте заменим один из стеклянных баллонов на адиабатический цилиндр или на эластичную камеру, и после свободного расширения в цилиндр или камеру произведем сжатие, выталкивая газ обратно в стеклянный баллон. Поскольку произведено сжатие и совершена работа над газом, то следует ожидать, что температура бани должна увеличиться. Однако, показание термометра, находящегося в бане не изменит своего показания. Таким образом, в опыте Джоуля температура в бане не изменяется не только при расширении, она не изменяется и при сжатии. Этот вывод строго согласуется с законом Джоуля  $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = 0$ .

В цикле Карно считается, что при адиабатическом расширении работа совершается газом за счет внутренней энергии. Предположение о возможности прямого превращения теплоты в работу в тепловой машине должно приводить к неустранимым противоречиям. Действительно, графики изотермы и адиабаты демонстрируются на плоскости  $PV$  для того чтобы показать их различие. Согласно законам математики, точка пересечения изотермы и адиабаты должна удовлетворять обоим уравнениям, т.е.

$$PV = PV^\gamma = const$$

Согласно законам математики, если в точке пересечения равны функции, то равны их константы. Это равенство возможно только при  $\gamma = 1$ . Однако показатели степени у адиабаты  $PV^\gamma$  является простым числом больше единицы. Отсюда следует, что уравнение Пуассона не отражает каких-либо свойств идеального газа. Изотерма и адиабата для

идеального газа являются одним и тем же процессом. Здесь скрыты нарушение правил математики.

Если не существует адиабаты, то не существует ни изобарной теплоемкости  $C_p$ , ни изохорной теплоемкости  $C_v$ . В действительности идеальный газ характеризуется только теплоемкостью  $C_{н.г.} = 3R$ .

Из статистической физики известно, что  $PV = \frac{2}{3}E$ , где  $E = \frac{3}{2}RT$  [3]. Подставляя второе уравнение в первое, и сократив на 2, получим калорическое уравнение идеального газа

$$3PV = 3RT.$$

Сократив это уравнение на 3, получим для одного моля идеального газа уравнение Клайперона-Менделеева

$$PV = RT.$$

Из этого уравнения, при  $T = const$ , получим уравнение Бойля-Мариотта. При  $P = const$  отношение  $T/V = const$  получим закон Гей-Люссака.

Обозначив полную энергию газа как  $U = 3RT$ , и взяв производную по температуре от этого равенства, получим

$$\frac{dU}{dT} = 3R.$$

Таким образом, теплоемкость идеального газа  $C_{н.г.} = 3R$ . Теплоемкость идеального газа не изменяется в любых процессах при работе тепловой машины.

Далее напомним, как получают теплоемкость  $C_p$  и  $C_v$ . Записав уравнение первого закона термодинамики в виде

$$dQ_p = dU_v + PdV \quad (3)$$

делят это уравнение на  $dT$ . Затем, получив из уравнения идеального газа  $\frac{dV}{dT} = \frac{R}{P}$ , подставляют это значение в уравнение (3), получают соотношение

$$C_p = C_v + R$$

Данное равенство известно как соотношение Майера.

Отметим, что цикл Майера опровергает не только соотношение Майера, из этого цикла следует, что уравнение закона сохранения и превращения энергии, записанное в формулах (1) и (3) является ошибочным. Действительно, закон сохранения применим только к газу участвующему в замкнутом цикле. Отсюда следует, что применить закон сохранения к отдельному процессу цикла по определению должно привести к неустранимому противоречию.

Действительно, как можно применить закон сохранения отдельно к изохорическому процессу. В этом процессе подведено энергии  $Q_{3 \rightarrow 1} = 3(P_1 - P_3) \cdot V_1$ ,

а работа  $A_U = 0$ . В изотермическом процессе внутренняя энергия не изменяется, а работа равна  $A_T = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ . При постоянной скорости смещения поршня, при изотермическом сжатии и расширении, внешние силы произведут работу равную  $A_T = 2RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ . В этом случае внешние силы сжатия незначительно превышают силы расширения.

Точно также как и при подъеме штанги и ее спуске, силы которые прикладывает штангист на бесконечно малую величину, отличаются одна от другой. При этом консерватив силы тяжести при подъеме и спуске производят работу равную нулю, а работа штангиста, как внешняя сила равна  $A_{ш} = 2mgh$ .

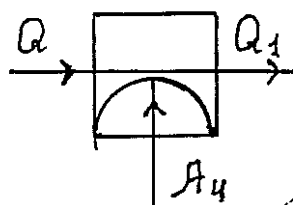
В изотермическом процессе, согласно опыту Джоуля, изменяется только объем. Поэтому не зависимо от того, свободно смещается поршень или квазистатически, внутренняя энергия газа не изменится. Энергия в точке 1 равна энергии в точке 2. Данное заключение является только следствием закона Джоуля  $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = 0$ .

Согласно рисунку цикла Майера в изохорическом процессе подведено тепла  $Q_{3 \rightarrow 1} = 3S_3$ , а в изобарическом процессе отведено тепла  $Q_{2 \rightarrow 3} = 3S_2$ , но площади  $S_3 = S_2$  равны между собой. Здесь равенство вытекает из свойства симметричной параболы, которая является изотермой идеального газа. Кроме того в изохорическом процессе подведено  $Q_{3 \rightarrow 1} = 3R(T_1 - T_3)$ , а отведено  $Q_{3 \rightarrow 2} = 3R(T_2 - T_3)$ , поскольку  $T_1 = T_2$ , то теплоемкость в изохорическом процессе  $C_2 = 3R$  и в изобарическом процессе  $C_p = 3R$ , т.е. теплоемкость идеального газа не зависит от процесса в котором участвует идеальный газ. Отсюда следует, что, сколько тепла подведено в изохорическом процессе, столько же удалено в изобарическом процессе. Другой физической интерпретации цикл Майера не допускает.

Таким образом, цилиндр с поршнем не преобразует непосредственно тепло в работу. Данное устройство преобразует тепло в давление, используя идеальный газ как рабочее тело, а внешние силы это давление преобразуют в работу.

Силы трения между колесами автомобиля и поверхностью дороги препятствуют свободному смещению поршня. Если силы трения равны нулю, автомобиль не сдвинется с места.

В связи с изменением формулировки первого закона термодинамики, его схему следует изобразить в виде:



Согласно измененной схеме первый закон термодинамики следует записать

$$Q = Q_1 = A_{ц}$$

Здесь  $Q$  – подведенное тепло,  $Q_1$  – отведенное тепло,  $A_{ц}$  – работа внешних сил за цикл.

КПД двигателя с внутренним сгоранием топлива согласно уравнению (2) будет иметь вид:

$$\eta = \frac{RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}{3(P_1 - P_3)V_1} = 0,63 \quad (4)$$

В двигателе Стирлинга теплота отводится при постоянном объеме, что позволяет преобразовать цикл Стирлинга в цикл Майера. В этом случае КПД двигателей с внутренним и внешним сгоранием должны быть одинаковыми. В книге показывается, что КПД двигателя Стирлинга достигает КПД двигателя Дизеля [4].

Далее следует отметить, что в обратном цикле Майера, можно исключить изобарный процесс, подводя тепло в точке 2. При этом изотермическое сжатие следует производить так, чтобы было возможно использовать постоянное давление в точке 2. В этом случае отопительный коэффициент теплового насоса будет определяться выражением

$$\varepsilon = \frac{1}{\eta} = \frac{3(P_1 - P_3)V_1}{RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - P(V_2 - V_3)} = 3,36 \quad (5)$$

Таким образом, в обратном цикле Майера отопительный коэффициент или работа внешних сил в 3,36 раза меньше перенесенного тепла.

Выше отмечалось, что адиабата для идеального газа является и изотермой. В реальном газе адиабата имеет физический смысл, поскольку в реальном газе сосуществуют два вида энергии – кинетическая движение молекул и энергия их взаимодействий, причем сумма этих энергий в адиабатическом цилиндре при изменении объема не изменяется. Однако соотношение двух энергий зависит от объема.

Например, в критической точке потенциальная энергия в два раза больше чем кинетическая энергия. Если сжимать газ от  $V_1 = 1$  до  $V_2 = 1/\sqrt{2}$  потенциальная энергия полностью преобразуется в кинетическую энергию. Используя преобразование энергии из одного вида в другой, можно увеличить отопительный коэффициент теплового насоса, работающего по циклу Майера в семь раз [5]. В данном случае, в обратном цикле Майера изотермический процесс заменяется адиабатическим. В этом процессе тепло из точки 2 переносится в точку 1, такое же количество как в изотермическом процессе, однако работа внешних сил в адиабатическом процессе уменьшается в семь раз. В точке 1 пересекаются изохора и изотерма идеального газа, а также адиабата реального газа, причем кривые уравнений в точке пересечения равны между собой [6].

Адиабата реального газа при расширении от  $V_2 = 1/\sqrt{2}$  до  $V_1 = 1$  уменьшает КПД теплового двигателя настолько, насколько эта же адиабата увеличивает отопительный коэффициент теплового насоса.

По  $PV, P$ -диаграмме в каждой точке можно определить температуру идеального газа и температуру реального газа, а также потенциальную энергию взаимодействия и убедиться в том, что теплоемкость реального газа  $C_{p,г.} = 3R$ , а потенциальная энергия плюс кинетическая энергия реального газа равна энергии идеального газа.

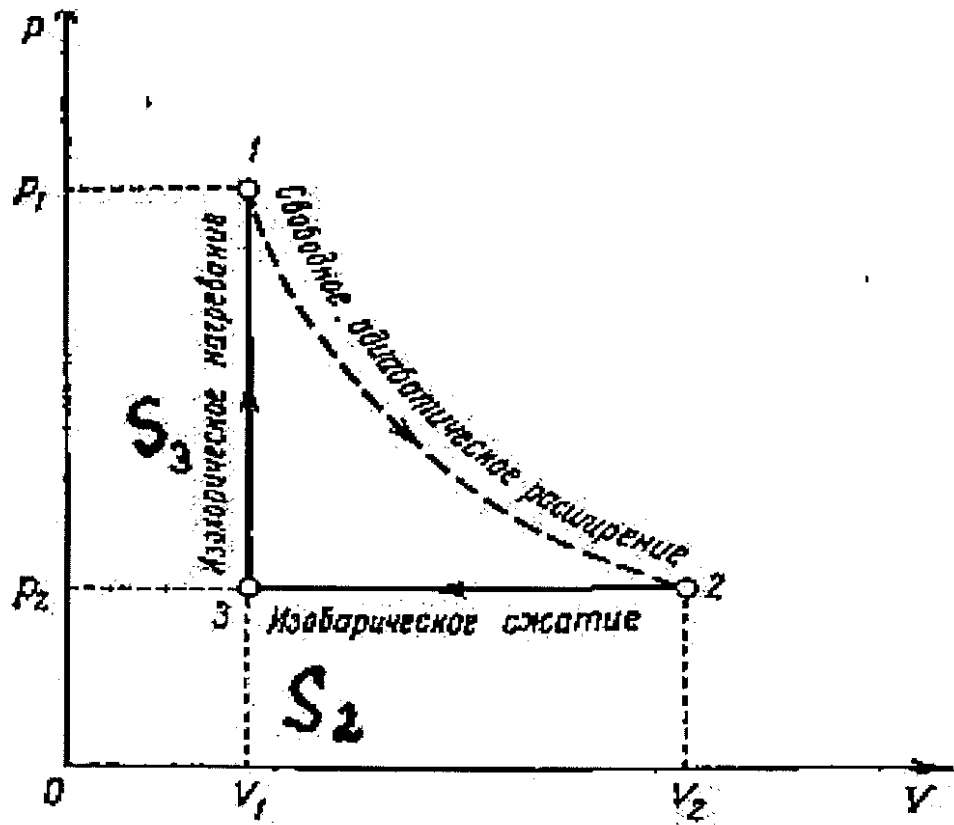
Из формулы (2) следует, что КПД тепловой машины не зависит от разности температур нагревающей и охлаждающей сред.

Если в цикле Майера в качестве рабочего тела использовать реальный газ, то можно убедиться в том, что отопительный коэффициент зависит от рабочего тела.

Цикл Майера состоит из трех процессов: изохоры, изотермы и изобары. Это самый простой цикл из всех возможных и тем не менее можно показать, что этот цикл имеет максимальное значение КПД.

Если в тепловом насосе, работающему по обратному циклу Майеру, использовать в качестве рабочего тела реальный газ, то его отопительный коэффициент может достигнуть максимального значения.

Полученные результаты согласуются с известным и воспроизводимым опытом Джоуля. Они не имеют внутренних противоречий и удовлетворяют требованию закона сохранения и превращения энергии. Наконец все выводы прямо следуют из цикла Майера.



Цикл Майера



## Список литературы

1. Э.Маделунг. Математический аппарат физики. Справочное руководство. М., «Наука» 1968г., с.544
2. Кубо Р. Термодинамика. М.: Мир, 1970г., с.54-56
3. Ландау Л.Д. и Лифшиц Е.Н. Статистическая физика. Часть 1. М.: Наука, 1976г., с.185
4. Уокер Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга. М.: «Наука» 1978г., с.140
5. Конов А.Ф. Обоснование принципа работы теплового насоса с максимальным отопительным коэффициентом. //Альтернативная энергетика и экология №1. 2011г.
6. Конов А.Ф. Критические параметры и критические явления. //Электронный математический и медико-биологический журнал. 2011г. Т.10. вып.4.