

Эффективность обратных циклов

© Ю.Б. Барковский, Е.Н. Моос, Н.И. Табунов

Рязанская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Костычева,
390044 Рязань, Россия

(Поступило в Редакцию 5 января 1997 г. В окончательной редакции 22 апреля 1998 г.)

Доказывается неправомерность общепринятой трактовки второго начала термодинамики при переносе утверждения о максимальном предельном КПД для прямого цикла Карно на обратные. Из рассмотрения обратимых циклов при сопоставлении с циклом Карно видно, что обратный цикл Карно является наихудшим по экономичности среди всех обратных циклов. Предложен новый показатель — термический КПД обратных циклов и доказана обобщенная теорема об аддитивности термических КПД прямого и обратного цикла. Предложена формулировка второго начала термодинамики с точки зрения эффективности обратных циклов.

Введение

В трактовке положений термодинамики часто допускаются неверные утверждения и выводы [1]. В частности, вопрос о термическом КПД обратных равновесных процессов и месте цикла Карно в этой группе круговых процессов до сих пор не решен. Одна из формулировок второго начала термодинамики указывает на существование некоторого предела для термического КПД, границы которого определяет самый эффективный прямой цикл Карно.

В прямых и обратных циклах рассматривается трансформация одних видов энергии в другие при условии выполнения закона сохранения. Учет неравновесности дает корректировку в анализе процессов для реальных циклов. В терминах КПД можно сформулировать, как и в терминах энтропии, эффективность и направление преобразования энергии. Поэтому рассмотрение прямых и обратных циклов может быть полезно как в химической, так и в технической термодинамике.

При сравнении обратимых циклов (далее условие обратимости специально оговаривать не будем) в качестве эталона берется цикл Карно [2], считающийся наиболее выгодным в прямом и обратном виде. Постулируется [3–6] превосходство обратного цикла Карно по показателям экономичности: холодильному и отопительному коэффициентам. При доказательстве этого исходят или из неверных посылок, или условия сравнения принимаются произвольными [7–9]. Ошибочно утверждение (см., например [3, 5]), что холодильный коэффициент цикла Карно имеет наибольшее значение по сравнению с другими обратными циклами при заданных температурах источников теплоты. В частности, для обратных циклов считают справедливым неравенство [9]

$$Q_2/W_c < T_2/(T_1 - T_2),$$

в котором $Q_2/W_c = \varepsilon$ — холодильный коэффициент; W_c — работа цикла; T_1, T_2 — температуры горячего и холодного источников теплоты.

Это выражение, однако, противоречит ”правилу тепловой машины” (второй теореме Карно), т.е. неравенству

$$W_c/Q_1 < (T_1 - T_2)/T_1.$$

Но зависимость между холодильным коэффициентом и термическим КПД такова [10], что чем эффективнее прямой цикл, тем менее эффективен он в обратном виде.

Представление о месте цикла Карно среди других обратных циклов трудно составить из-за отсутствия показателя, аналогичного термическому КПД прямых циклов. Поэтому невыразительно [11] объяснение невозможности спонтанной концентрации энергии с помощью теплового насоса в нарушение второго начала термодинамики.

Невозможно сформулировать второе начало термодинамики через существующие показатели эффективности обратных циклов. ”Механический” перенос утверждения о цикле Карно как наиболее эффективном среди прямых на обратные, как показано в данной работе, ошибочен.

Сравнение обратных циклов

Для анализа приведем известные теоремы.

1-я теорема Карно. Термический КПД $\hat{\eta}_C$ прямого цикла Карно зависит только от температур источников теплоты

$$\hat{\eta}_C = 1 - T_2/T_1.$$

2-я теорема Карно. Прямой цикл Карно превосходит по термическому КПД все другие при заданных температурах T_1 и T_2

$$\hat{\eta}_C > \hat{\eta}. \quad (1)$$

Эффективность обратных циклов характеризуют величиной отопительного коэффициента ψ

$$\psi = Q_1/W_c = Q_1/(Q_1 - Q_2).$$

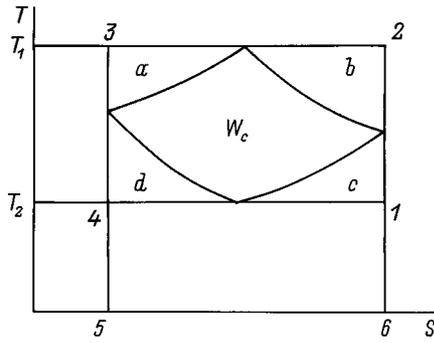


Рис. 1.

Так как термический КПД произвольного прямого цикла

$$\hat{\eta} = (Q_1 - Q_2)/Q_1,$$

то

$$\psi = 1/\hat{\eta}.$$

Из второй теоремы Карно получается $1/\psi_c > 1/\psi$ или

$$\psi_c < \psi. \quad (2)$$

Таким образом, любой обратный цикл при заданных пределах температур имеет отопительный коэффициент выше, чем соответствующий цикл Карно. Тот же результат можно получить, сравнивая цикл Карно и произвольный обратный цикл на B, T -диаграмме. Сопоставляемые циклы должны располагаться между предельными температурами T_1 и T_2 , чтобы исключить неоднозначность.

Другой показатель эффективности обратных циклов — холодильный коэффициент

$$\varepsilon = Q_2/W_c = Q_2/(Q_1 - Q_2).$$

Вписав в цикл Карно произвольный цикл (рис. 1), видим, что $Q_{2,c}$ равна площади прямоугольника 1456, та же теплота произвольного цикла Q_2 представляет сумму площадей $1456 + c + \alpha$, поэтому $Q_{2,c} < Q_2$. Работа цикла Карно $W_{c,c}$, равная площади прямоугольника 1234, больше работы произвольного цикла W_c на величину $a + b + c + d$, откуда $W_{c,c} > W_c$. Следовательно, $Q_{2,c}/W_{c,c} < Q_2/W_c$ или

$$\varepsilon_c < \varepsilon,$$

что соответствует выводу (2). Значит, отопительный и холодильный коэффициенты произвольного обратного цикла больше соответствующих показателей обратного цикла Карно.

Характеристики ε и ψ удобны для оценки полезных качеств обратного цикла, но не отражают проявления второго начала, как это можно сделать с помощью термического КПД прямого цикла. Отсутствие такого показателя — термического КПД обратного цикла затрудняет получение непротиворечивых результатов при термодинамическом анализе.

Термический КПД обратных циклов

Из определения коэффициент полезного действия во всех случаях должен быть правильной дробью [12] как отношение полезного эффекта к энергетическим затратам.

Тепловые насосы, работающие по обратным циклам, позволяют осуществить перенос теплоты от холодных тел к горячим. Коэффициент полезного действия для тепловых машин следует определить как отношение разности поступающей в рабочее тело энергии Q_1 и энергии компенсации E к энергии Q_1 , т.е.

$$\eta = (Q_1 - E)/Q_1. \quad (4)$$

В случае прямых циклов E — это отбираемая от рабочего тела теплота Q_2 , тогда

$$\hat{\eta} = (Q_1 - Q_2)/Q_1,$$

а для обратных циклов — это работа (механическая энергия) W_c , требуемая для переноса теплоты от холодного тела к горячему, поэтому

$$\hat{\eta} = (Q_1 - W_c)/Q_1 = Q_2/Q_1.$$

Согласно второй теореме Карно, $1 - T_2/T_1 = \eta_c > \hat{\eta} = 1 - Q_2/Q_1$, и $T_2/T_1 < Q_2/Q_1$, получим

$$\hat{\eta}_c < \hat{\eta}. \quad (5)$$

Неравенство (5) согласуется с (2) и (3), т.е. обратный цикл Карно самый неэффективный.

Множественность показателей эффективности прямых и обратных циклов и их взаимосвязь

Может показаться, что введение третьего показателя эффективности для обратного цикла является избыточным. Но для прямого цикла известен коэффициент теплофикации ε_t , который указывает на возможность утилизации теплоты, выбрасываемой в прямом цикле,

$$\varepsilon_t = \hat{\eta} + Q_2/Q_1.$$

Для прямого цикла можно предложить также экологический показатель

$$\varepsilon_e = W_c/Q_2,$$

характеризующий одновременно рабочую эффективность двигателя (если $\varepsilon_e > 1$, двигатель работает по наиболее совершенному циклу).

В результате прямой и обратной циклы можно охарактеризовать системой взаимосвязанных показателей. Действительно, известно [13], что

$$\hat{\eta}(\varepsilon + 1) = 1. \quad (6)$$

Однако это соотношение не является единственным, так как

$$\widehat{\eta} \cdot \psi = \varepsilon \cdot \varepsilon_e = \varepsilon_t = 1, \quad (7)$$

а также

$$\widehat{\eta}(\varepsilon_e + 1) = 1, \quad (8)$$

что эквивалентно (6). Показатели эффективности обратных циклов связаны аналитически

$$\widehat{\eta} = \varepsilon / \psi. \quad (9)$$

Из соотношений (6)–(8) следует, что для цикла Карно ε_e и $\widehat{\eta}$ имеют максимальное значение, ψ , ε , $\widehat{\eta}$ — минимальное по сравнению с другими циклами. Таким образом, прямой цикл Карно — самый эффективный по всем показателям, а обращенный, наоборот, — наименее.

Теорема об аддитивности КПД прямого и обращенного циклов

Наиболее общим с точки зрения первого начала термодинамики является свойство аддитивности коэффициентов полезного действия. Легко показать, введя $\widehat{\eta}$, что в любом круговом процессе сумма термических КПД составляет единицу

$$\widehat{\eta} + \widehat{\eta} = 1. \quad (10)$$

Это утверждение можно рассматривать как теорему об аддитивности коэффициентов полезного действия прямого и обращенного циклов, аналитическое выражение которой наряду с (6)–(9) объединяет показатели обеих групп круговых процессов. При увеличении разницы между температурами горячего и холодного источников во всяком цикле происходит увеличение $\widehat{\eta}$ и уменьшение $\widehat{\eta}$. Формула (10) представляет собой рациональное выражение условия обратимости трансформаций теплоты и работы в круговом процессе, проводимом в прямом, а затем в обратном направлениях, или в системе двух одинаковых сопряженных циклов, один из которых прямой, а другой обратный (рис. 2), и эквивалентна записи этого условия в форме (6)–(8).

Из теоремы (10) видна ошибочность вывода [14] о равенстве КПД сопряженных циклов.

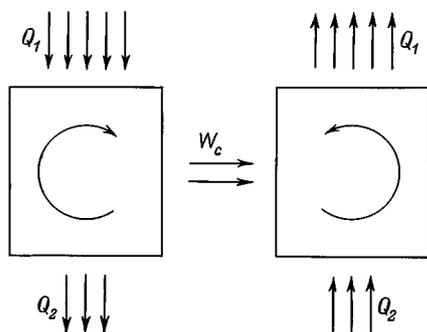


Рис. 2.

Можно сформулировать второе начало термодинамики с точки зрения КПД обратного цикла: невозможно полностью передать энергию от холодного тела к горячему без дополнительной затраты энергии (энергии компенсации) на реализацию этого процесса, т.е. $\widehat{\eta}$, равный единице, недостижим.

Равновесные условия обеспечивают наибольшее значение КПД прямого и обратного циклов.

Получим некоторый "инверсный" принцип Карно: чем больше разность температур двух источников, тем ниже эффективность машин и устройств, работающих по обратному циклу.

Очевидно, что для неравновесных процессов

$$\widehat{\eta}_i + \widehat{\eta} < 1$$

или

$$\widehat{\eta} + \widehat{\eta}_i < 1,$$

где индекс i относится к необратимым процессам.

Заключение

В обратных циклах отношение Q_2/Q_1 показывает эффективность перехода теплоты от холодного источника к горячему аналогично выражению $1 - Q_2/Q_1$, отражающему эффективность перехода теплоты в работу согласно второму началу термодинамики. По этому сходству отношение Q_2/Q_1 предложено назвать термическим КПД обратного цикла.

Введение термического КПД $\widehat{\eta}$ как универсального показателя позволяет с единых позиций оценить обратный цикл независимо от условий применения теплового насоса (холодильная, отопительная, теплохолодильная установки) и рационально выразить условие обратимости энергетических превращений в круговом процессе. Подтверждается вывод о том, что среди обратных циклов цикл Карно утрачивает значение эталонного цикла. Предложенный $\widehat{\eta}$ позволяет сделать его равноправным с $\widehat{\eta}$ при формулировке второго начала термодинамики для равновесных и для неравновесных процессов.

Список литературы

- [1] Базаров И.П. Заблуждения и ошибки в термодинамике. М.: Изд-во МГУ, 1993. 56 с.
- [2] Алексеев Г.Н. Общая теплотехника. М.: Высшая школа, 1980. 552 с.
- [3] Вукалович М.П., Новиков И.П. техническая термодинамика. М.; Л.: Госэнергоиздат. 1955. 336 с.
- [4] Жуковский В.С. Термодинамика. М.: Энергоатомиздат, 1983. 304 с.
- [5] Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1980. 3-е изд. 469 с.
- [6] Шмидт Э. Введение в техническую термодинамику. М.; Л.: Энергия, 1965. Пер. с нем. 392 с.
- [7] Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Энергоатомиздат, 1983. 4-е изд. 416 с.

- [8] Техническая термодинамика. Учебник для вузов / Под ред. В.И. Крутова. М.: Высшая школа, 1981. 2-е изд. 493 с.
- [9] *Фен Дж.* Машины, энергия, энтропия. М.: Мир, 1986. Пер. с англ. 336 с.
- [10] *Квасников И.А.* Термодинамика и статистическая физика. Теория равновесных систем. М.: Изд-во МГУ, 1991. 800 с.
- [11] *Арцимович Л., Капица П., Тамм И.* // Правда. 1959. № 326.
- [12] Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. Энциклопедия, 1983.
- [13] *Белоконь Н.И.* Основные принципы термодинамики. М.: Недра, 1968. 110 с.
- [14] *Орир Дж.* Физика. М.: Мир, 1981. Т. 1. Пер. с англ. 336 с.