

### Про помилкову інтерпретацію теореми Карно

**В.М. Ігнатович,**  
кандидат технічних наук  
НТУУ “КПІ”

(Представлено академіком АН ВШ України Н.О.Вірченко)

*Проаналізовано зміст понять коефіцієнта корисної дії різноманітних перетворювачів енергії. Показано, що з теореми Карно не випливає висновок про неможливість повного перетворення тепла в інші види енергії*

У курсах термодинаміки або загальної фізики часто можна прочитати, що перетворення роботи в теплоту відбувається легко і повністю, але зворотній процес підкоряється ряду обмежень, що впливають із другого закону (початку) термодинаміки.

В літературі часто зустрічаються твердження на зразок наступних:

“...Теплота должна рассматриваться как низшая или деградированная форма энергии; она не может целиком превращаться в механическую работу” [5, с.153].

“Химическая, механическая и электрическая энергия могут целиком переходить в другие виды энергии (в том числе и в тепло); тепло же не в

состоянии полностью перейти в другие виды энергии” [2, с.40]. “Невозможность полного перехода тепла в другие виды энергии и составляет ту специфичность тепла, которая ему присуща” [2, с.41].

“Тепло и механическая энергия эквивалентны с точки зрения сохранения энергии..., но отнюдь не второго начала. Коротко говоря, механическая энергия более “высокого сорта” (более когерентна), чем тепло и всегда может быть превращена в тепло. Обратное неверно” [8, с.354].

Для таких тверджень, на перший погляд, є підстави. Ефективність перетворення енергії кількісно характеризується коефіцієнтом корисної дії (ККД).

“Коеффициент полезного действия (кпд) – характеристика эффективности системы (устройства, машины) в отношении преобразования или передачи энергии; определяется отношением  $\eta$  полезно использованной энергии  $W_{пол}$  к суммарному количеству энергии  $W_{сум}$  полученному системой:  $\eta = W_{пол} / W_{сум}$ . Кпд – величина безразмерная... Из-за неизбежных потерь энергии на трение, нагревание окружающих тел и т.п. всегда  $\eta < 1$ ...” [9, с.317–318].

І ось, виявляється, що у випадку перетворення тепла у механічну енергію, яке здійснюється в тепловому двигуні, навіть в ідеальному випадку – у випадку ідеальної теплової машини, коли нема втрат на тертя – ККД такого перетворення, відповідно до теореми Карно, не може дорівнювати 1:

“Карно теорема, теорема о макс. коэффициенте полезного действия тепловых двигателей...: кпд  $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$  Карно цикла максимален и не зависит от природы рабочего в-ва и конструкции идеального теплового двигателя, он определяется только темп-рами нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$ ” [9, с.244].

Таке обмеження максимальної величини ККД теплового двигуна пов'язують з дією другого закону термодинаміки. “Второе начало... выражает особенности теплового движения... Согласно этому закону, к.п.д. теплового двигателя даже в идеальных условиях не может быть равен 1, в то время как в этих условиях к.п.д., например, двигателя, превращающего электрическое воздействие в механическую работу (электродвигатель) равен 1” [1, с.172].

“У тепловых двигателей в силу *второго начала термодинамики* кпд имеет верхний предел, определяемый особенностями термодинамического цикла (кругового процесса), который совершает рабочее вещество. Наибольшим кпд обладает *Карно-цикл*” [9, с.318].

Неважно, однак продемонструвати, що з теореми Карно висновок про неможливість повного перетворення тепла у інші види енергії не впливає. Відмінність верхньої межі ККД теплових двигунів від 1 пов'язана не з особливостями теплоти, а з **особливостями визначення**

ККД теплових двигунів, з тим, що ККД теплових двигунів визначають інакше, ніж ККД інших перетворювачів енергії. Щоб це продемонструвати, проаналізуємо визначення ККД різних перетворювачів енергії – електродвигунів, ГЕС, джерел і приймачів випромінювання, теплових двигунів.

**Електричні двигуни** – це пристрої, призначені для перетворення електричної енергії в механічну. В електродвигуні за одну секунду перетворюється в інші форми електрична енергія в кількості, що дорівнює споживаній потужності  $P_1$  і виникає механічна енергія в кількості, що дорівнює потужності на валу двигуна  $P_2$ . Різниця  $P_1 - P_2$ , перетворюється у теплоту [4, с.256]. **ККД електродвигуна**  $\eta$  визначається як  $P_2/P_1$  [4, с.257], тобто як відношення кількості електроенергії, що перетворилась в електродвигуні у механічну енергію до загальної кількості електроенергії, що перетворилась в електродвигуні в інші форми.

У ГЕС потенційна енергія води перетвориться в електроенергію. **ККД ГЕС** дорівнює відношенню кількості електроенергії, що виникає за одну секунду (потужності станції) до кількості перетвореної в інші форми потенційної енергії води (потужності потоку в створі) [10, с.402–403].

**ККД джерела випромінювання** визначається як відношення потоку випромінювання (тобто потужності переносу енергії випромінювання) до потужності, споживаної джерелом (тобто енергії, перетвореної джерелом випромінювання в інші форми) [7, с.59].

При падінні на **приймач випромінювання** енергія випромінювання частково відбивається, частково поглинається. Енергія, що поглинається, частково перетвориться в так звану ефективну енергію – корисну форму (наприклад, електричну у випадку фотоелемента), частково в енергію втрат – форми енергії, що побічно виникають у процесі перетворення [7, с.42–43]. **Коефіцієнт поглинання випромінювання** ( $b_e$ ) показує, яка частка енергії випромінювання, що впало на приймач випромінювання, перетворюється в інші форми енергії. **Енергетичний вихід процесу перетворення енергії випромінювання** ( $\eta_e$ ) дорівнює відношенню ефективної енергії до енергії випромінювання, що поглинається приймачем. **Інтегральна чутливість приймача випромінювання** пропорційна відношенню ефективної енергії до енергії випромінювання, що впала на приймач:  $K = cb_e\eta_e$  [7, с.42–43]. Інтегральна чутливість ще називається коефіцієнтом перетворення [10, с.586].

ККД електродвигуна, ККД ГЕС, ККД випромінювача, енергетичний вихід процесу перетворення енергії випромінювання показують, яка частина енергії, що змінила в перетворювачі форму, перетворилася в корисну форму. Ці показники характеризують відповідні перетворювачі енергії в одному відношенні – показують, наскільки “чисто” протікає процес перетворення. Відхилення від одиниці цих показників обумовлено протіканням побічних процесів перетворення енергії, небажаних щодо

призначення перетворювачів. При обчисленні цих показників  $W_{\text{сум}}$  означає енергію, що змінила в перетворювачі форму, тобто енергію, **перетворену в інші форми**. Якщо в перетворювачі не відбуваються небажані перетворення енергії, його ККД дорівнює одиниці.

Тепловий двигун перетворює теплоту в механічну енергію (роботу). В ідеальному тепловому двигуні не відбувається побічних процесів перетворення енергії. Чому ж ККД ідеального теплового двигуна, на відміну від ККД названих вище перетворювачів, менше одиниці?

Тому, що при визначенні ККД теплового двигуна  $W_{\text{сум}}$  означає не теплову енергію перетворену в двигуні в інші форми, як у названих вище випадках, а теплову енергію, **підведену** до двигуна – величину, аналогічну енергії випромінювання, що впала на приймач, у випадку перетворення випромінювання.

Якщо подібним чином визначити ККД ГЕС, тобто назвати ККД ГЕС величину, що показує, яка частка потенційної енергії води, підведеної до станції у верхньому б'єфі, перетвориться в електроенергію, то для ККД ідеальної ГЕС, у якій немає побічних перетворень енергії, можна отримати формулу, подібну до формули для залежності ККД ідеального теплового двигуна Карно від температури:  $\eta_{\text{ГЕС}} = (H_B - H_H) / H_B$ , де  $H_B$  і  $H_H$  – абсолютна (стосовно рівня моря) висота рівнів води у верхньому і нижньому б'єфі відповідно. Ґрунтуючись на цій формулі, можна стверджувати, що в ГЕС, навіть в ідеальному випадку, потенційна енергія води перетворюється в електроенергію не повністю. До речі, так свого часу вважав Ернст Мах, який писав: «Тяжесть  $P$  на висоті  $H_1$  представляет энергию  $W_1 = PH_1$ . Заставим ее упасть до меньшей высоты  $H_2$ . При этом производится работа, которой пользуются для получения живой силы, теплоты, электрического заряда и т. д., или которая, говоря короче, преобразуется. Тогда еще *остається* энергия  $W_2 = PH_2 \dots$ » [6, с.118-119].

ККД теплового двигуна можна порівняти з величиною інтегральної чутливості приймача випромінювання, що пропорційна відношенню корисної форми енергії до енергії, що впала на приймач. Якщо інтегральну чутливості приймача випромінювання розділити на коефіцієнт пропорційності  $c$ , отримаємо величину, аналогічну ККД теплового двигуна. У той же час, якщо визначити ККД теплового двигуна таким же чином, як визначається енергетичний вихід процесу перетворення енергії випромінювання, ККД електродвигуна, ККД ГЕС – тобто як відношення кількості механічної енергії, що з'являється у двигуні за один цикл до кількості теплоти, перетвореної за один цикл в інші форми енергії, – то можна одержати, що ККД ідеального теплового двигуна дорівнює одиниці і не залежить від температур нагрівача і холодильника – так само, як ККД інших ідеальних перетворювачів енергії.

На закінчення зауважимо, що О.А.Гухман у свій час вказував на принципову відмінність ККД теплового двигуна від ККД інших пристроїв.

Він писав, що в ККД мають відображатися втрати енергії, обумовлені ефектами, чужорідними стосовно основного процесу, що відбувається відповідно до призначення пристрою; що “было бы совершенно неправильно рассматривать величину  $\eta$  (для теплового двигателя, – В.І.) в духе обычного понимания – как некую меру уменьшения (под влиянием этого рода эффектов) теоретически достижимого результата при переходе к реальным условиям” [3, с.187], що у випадку теплового двигуна ККД має інший зміст, і що тому його варто називати іншим терміном – ККД циклу чи, повніше, термічний ККД циклу. На жаль, він не зробив висновок про некоректність порівняння теплових двигунів з іншими перетворювачами енергії за величиною ККД.

### **Висновки**

ККД теплових двигунів і ККД ряду інших перетворювачів енергії (наприклад, електродвигунів, ГЕС, джерел випромінювання) характеризують відповідні перетворювачі енергії в різному відношенні. Порівняння теплових двигунів з іншими перетворювачами енергії за величиною ККД є логічно некоректним. З теореми Карно не випливає висновок про неможливість повного перетворення тепла в інші види енергії.

### **Література**

1. Базаров И.П. Термодинамика / 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.школа, 1991. – 376 с.
2. Гохштейн Д.П. Остановятся ли мировые часы? (Популярное изложение учения об энтропии). – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 104 с.
3. Гухман А.А. Об основаниях термодинамики. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 384 с.
4. Иванов И.И., Равдоник В.С. Электротехника. – М.: Высш. школа, 1984. – 375 с.
5. Лаберенн П. Происхождение миров. – М.: Гостехтеориздат, 1957. – 260 с.
6. Мах Э. Научно-популярные очерки. – М.: Типолитография т-ва Кушнерев и Ко, 1901. – 128 с.
7. Мешков В.В. Основы светотехники. Ч. 1 / 2-е изд. М.: Энергия, 1979. – 368 с.
8. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
9. Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.
10. Энергетика / Швец, И.Т., Толубинский В.И., Букшпун И.Д. и др; изд. 2-е, перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1971. – 616 с.