

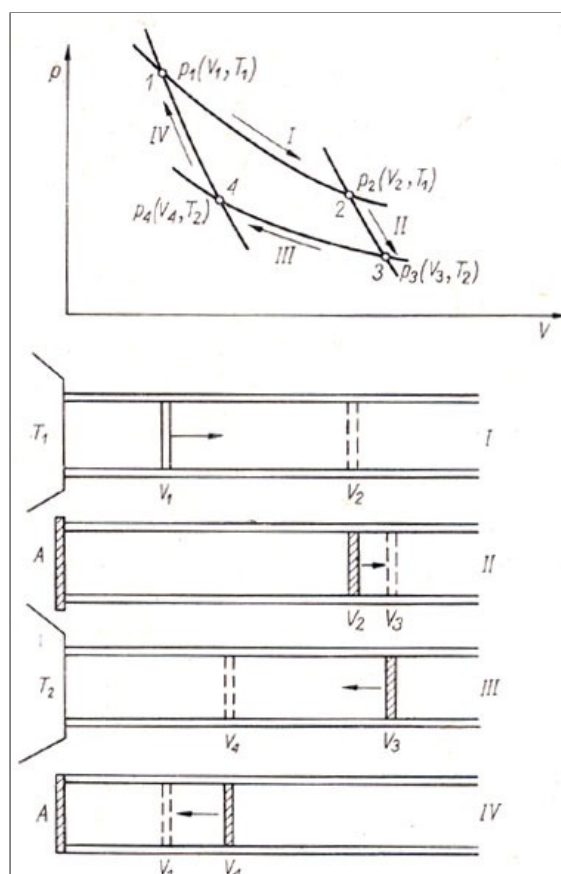
Cykl Carnota

Rozważania poniższe dotyczą maszyny cieplnej wyidealizowanej, w której procesy przebiegają odwracalnie. Nie ma tu strat ciepła spowodowanych tarciami lub uchodzeniem przez ściany izolujące. Maszyna ta wykonuje cykl zamknięty Carnota, tzn. po pewnej liczbie przemian wraca z powrotem do stanu wyjściowego. Ciałem, które podlega procesowi cyklicznemu, jest gaz doskonały.

Cykl Carnota składa się z 4 kolejnych procesów:

- I. Rozprężania izotermicznego w temperaturze T_1 .
- II. Rozprężania adiabatycznego przy zmianie temperatury od T_1 do T_2 .
- III. Sprężania izotermicznego w temperaturze T_2 .
- IV. Sprężania adiabatycznego przy zmianie temperatury od T_2 do T_1 .

Po przejściu tych czterech procesów gaz wraca do stanu wyjściowego. Rysunek 1 przedstawia wykres cyklu Carnota we współrzędnych p, V ; poniżej wykresu są pokazane położenia tłoka w zbiorniku gazu na początku i na końcu każdego procesu. Zbiornik gazu ma ścianki i tłok z osłony adiabatycznej, tzn. nie przepuszczającej ciepła, doskonale zaś przepuszczająca ciepło podstawa może być ustawiona na zbiorniku ciepła o temperaturze T_1 , zwanym grzejnicą, lub na zbiorniku o temperaturze niższej T_2 , zwanym chłodnicą, albo też na osłonie adiabatycznej A. Punkty 2 i 3 cyklu Carnota mogą być dowolnie obrane, byleby leżały na izotermach odpowiadających temperaturom T_1 i T_2 , natomiast punkt 4 o współrzędnych p_4, V_4, T_4 nie może być dowolnie obrany na izotermie, ponieważ wartości p_4 i V_4 są wyznaczone przez wartości p_1, V_1, T_1 punktu początkowego 1 oraz temperaturę T_2 . Zmiany objętości gazu i jego temperatury oraz wielkość pracy wykonanej przez gaz i ilość ciepła pobranego w poszczególnych procesach cyklu zestawione są w Tabeli 1.



Rysunek 1 Cykl Carnota: a) Wykres cyklu, b) położenie tłoka na początku i na końcu każdego procesu

Tabela 1

Proces	Rozprężanie izotermiczne	Rozprężanie adiabatyczne	Sprężanie izotermiczne	Sprężanie adiabatyczne
Zmiana objętości	$V_1 \rightarrow V_2$	$V_2 \rightarrow V_3$	$V_3 \rightarrow V_4$	$V_4 \rightarrow V_1$
Zmiana temperatury	$T_1 = const.$	$T_1 \rightarrow T_2$	$T_2 = const.$	$T_2 \rightarrow T_1$
Wykonana praca	$W = RT_1 \ln \frac{V_1}{V_2}$	$W_2 = c_v(T_2 - T_1)$	$W_3 = -RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3}$	$W_4 = c_v(T_1 - T_2)$
Ciepło pobrane	Q_1	0	Q_2	0

Dla procesów adiabatycznych (II i IV) możemy zapisać następujące związki:

$$V_3^{\gamma-1} T_2 = V_2^{\gamma-1} T_1$$

$$V_4^{\gamma-1} T_2 = V_1^{\gamma-1} T_1$$

Dzieląc stronami otrzymujemy:

$$\left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}$$

czyli:

$$\frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1} \cdot *$$

Praca wykonana w procesie III wynosi:

$$W_3 = -RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3},$$

$$W_3 = RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}.$$

Korzystając z * możemy zapisać:

$$W_3 = -RT_2 \ln \frac{V_1}{V_2},$$

czyli:

$$W_1 = -W_3.$$

Podczas cyklu gaz pobrał z grzejnicy o temperaturze T_1 ciepło Q_1 i oddał do chłodnicy o temperaturze T_2 ilość ciepła Q_2 oraz wykonał pracę W_1+W_2 , a pobrał W_3+W_4 .

Widzimy, że suma prac w procesach adiabatycznych jest równa 0. Zatem suma prac pobranych i wykonanych w cyklu Carnota, wynosi:

$$W = W_1 + W_3 = R(T_1 - T_2) \ln \frac{V_1}{V_2}.$$

Z I zasady termodynamiki dla przemiany izotermicznej mamy $W = -Q$, czyli:

$$W_1 = RT_1 \ln \frac{V_1}{V_2} = -Q_1$$

i analogicznie:

$$W_3 = -RT_2 \ln \frac{V_1}{V_2} = -Q_2$$

stąd:

$$W = W_1 + W_3 = R(T_1 - T_2) \ln \frac{V_1}{V_2} = -(Q_1 + Q_2).$$

Ponieważ $V_1 < V_2$, więc W_1 jest ujemne, W_3 – dodatnie, W zaś ujemne, gdyż $T_1 > T_2$. Zatem Q_1 jest dodatnie, Q_2 jest ujemne i oznacza ciepło oddane. Rezultatem cyklu jest więc praca W wykonana przez gaz kosztem pobranego ciepła $|Q_1| - |Q_2|$. Ponieważ $|W_1| > |W_2|$ bo $T_1 > T_2$, więc $|Q_1| > |Q_2|$, czyli ciepło pobrane jest większe od oddanego.

Wprowadzamy definicję *wydajności (sprawności) cyklu* jako stosunek ciepła $|Q_1| - |Q_2|$ zamienionego na pracę do całkowitego ciepła pobranego $|Q_1|$:

$$\eta = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|}.$$

Dla silnika Carnota można również zapisać:

$$\eta = \frac{|W|}{|W_1|} = \frac{R(T_1 - T_2) \left| \ln \frac{V_1}{V_2} \right|}{RT_1 \left| \ln \frac{V_1}{V_2} \right|},$$

czyli:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

I twierdzenie Carnota:

Wszystkie maszyny termodynamiczne odwracalne pracujące między tymi samymi temperaturami mają tę samą sprawność.

II twierdzenie Carnota

Silnik nieodwracalny nie może mieć większej sprawności od silnika odwracalnego.