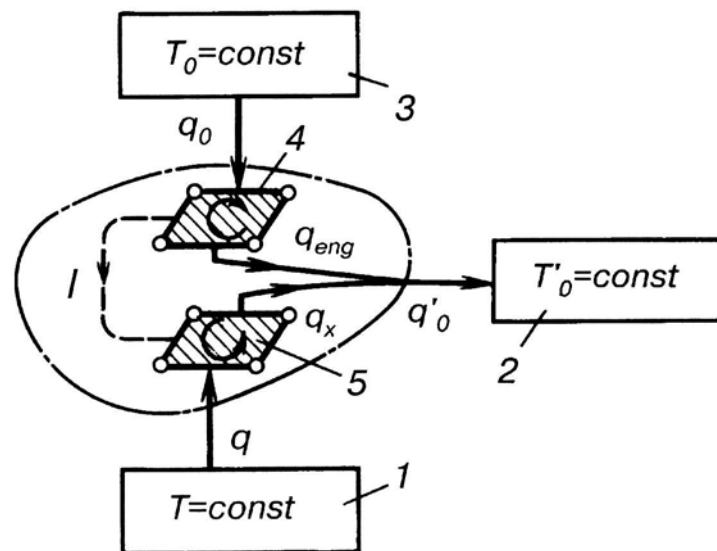


Chłodziarki z regeneracyjnymi wymiennikami ciepła – ciąg dalszy

Chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa

W 1918 roku Rudolph Vuilleumier opatentował w USA chłodziarkę, której istota działania sprowadza się do wykorzystania trzech źródeł ciepła o różnych poziomach temperatur. W roku 1951 podobne rozwiązanie zostało opatentowane ponownie przez K.W. Taconisa, profesora Uniwersytetu w Lejdzie. Praktyczne zainteresowanie takimi chłodziarkami datuje się od lat 60-tych XX wieku i związane jest z burzliwym rozwojem programów kosmicznych. Istota chłodziarki wykorzystującej trzy różnotemperaturowe źródła ciepła polega na tym, że pomiędzy górnym i pośrednim źródłem ciepła zostaje zrealizowany obieg silnika cieplnego, a wytworzona w nim praca zostaje następnie zużyta do realizacji lewobieżnego obiegu chłodniczego realizowanego pomiędzy źródłem pośrednim i dolnym.

Przeprowadźmy termodynamiczną analizę takiej chłodziarki posługując się rysunkiem 1.



Rysunek 1. Termodynamiczny schemat chłodziarki wykorzystującej trzy źródła ciepła; 1 - niskotemperaturowe źródło ciepła (kriostatowany obiekt), 2 - pośrednie źródło ciepła (otoczenie), 3 - wysokotemperaturowe źródło ciepła, 4 - idealny silnik Carnota, 5 - idealna chłodziarka Carnota.

Przyjmując, że zarówno silnik 4 jak i chłodziarka 5 schematycznie przedstawione na rysunku 1 realizują obiegi Carnota, otrzymujemy:

$$l = q_o - q_{eng}; \quad q = q_x - l; \quad l = q_o (T_o - T'_o) / T_o; \quad (1)$$

$$q = l T / (T'_o - T); \quad q'_o = q_{eng} + q_x = q_o + q$$

Stąd wynikają teoretycznie najlepsze stosunki ciepła pobranych przez chłodziarkę i oddanych do otoczenia:

$$\left(\frac{q}{q_o}\right) = \frac{T(T_o - T_o')}{T_o(T_o' - T)} \quad ; \quad (2)$$

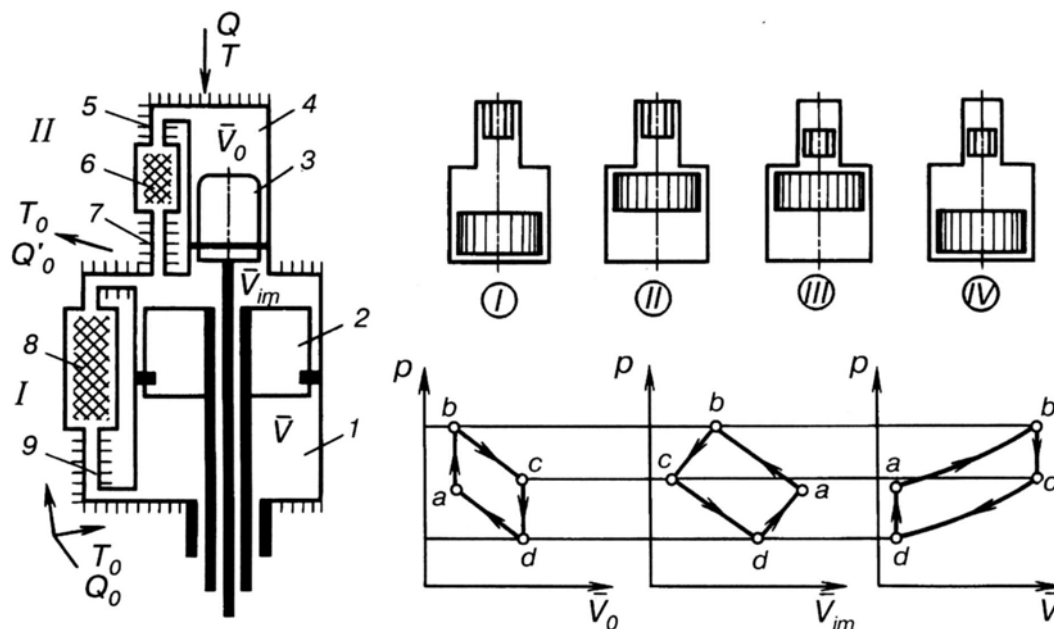
$$\left(\frac{q}{q'_o}\right) = \frac{T(T_o - T_o')}{T_o'(T_o' - T)} \quad ; \quad (3)$$

$$\left(\frac{q'_o}{q_o}\right) = \frac{T_o'(T_o - T)}{T_o(T_o' - T)} \quad . \quad (4)$$

Przykładowe wartości stosunków ciepł opisanych równaniami (2-4) policzone dla $T_o = 300 \text{ K}$, $T_o' = 77 \text{ K}$ oraz różnych wartości temperatury kriostatowania T podane są w tabeli 1. Dla porównania podano również efektywności chłodziarek Carnota pracujących pomiędzy skrajnymi źródłami ciepła.

T, K	40	30	20	15
(q/q_o)	0,805	0,476	0,261	0,18
(q/q'_o)	0,446	0,322	0,207	0,152
(q'_o/q_o)	1,8	1,476	1,26	1,18
$\varepsilon_c = T/(T_o - T)$	0,154	0,111	0,0715	0,0345

Zasadę działania chłodziarki Vuilleumiera - Taconisa przedstawia rysunek 2.



Rysunek 2. Chłodziarka Vuilleumiera - Taconisa schemat konstrukcyjny i odwzorowanie przemian na wykresach p-v; 1 - ciepły cylinder, 2 - ciepły tłok, 3 - zimny tłok, 4 - zimny cylinder, 5 - niskotemperaturowy wymiennik ciepła (temperatura kriostatowania), 6 - niskotemperaturowy regenerator, 7 - pośredni wymiennik ciepła (temperatura otoczenia), 8 - ciepły regenerator, 9 - wysokotemperaturowy wymiennik ciepła, V_o - komora zimna, V - komora ciepła, V_{im} - komora pośrednia.

Chłodziarka składa się z dwóch cylindrów (ciepłego 1 i zimnego 4), w których umieszczone zostały tłoki (ciepły 2 oraz zimny 3) powodujące przepływ gazu przez regeneratory (ciepły 8 oraz zimny 6). Całkowita objętość chłodziarki na którą składają się objętości trzech komór ciepłej V , pośredniej V_{im} oraz zimnej V_o , pozostaje w trakcie pracy urządzenia stała.

Ciśnienie w chłodziarce jest jednakowe we wszystkich komorach. Niewielkie (pomijalne) różnice ciśnień wynikają z oporów przepływu gazu przez regeneratory. Zmiany ciśnienia w chłodziarce są związane z dopływami i odpływami ciepła do gazu roboczego.

Cykl pracy chłodziarki można podzielić na 4 etapy zilustrowane schematycznie na rysunku 2.

Etap I-II. W trakcie tej fazy pracy chłodziarki tłok zimny 3 znajduje się w górnym skrajnym położeniu i pozostaje nieruchomy. Początkowo praktycznie cały gaz (pomijając objętość regeneratorów, przewodów i objętości martwe cylindrów) znajduje się w komorze pośredniej V_{im} , z której zostaje w znacznej części przetłoczony przez ciepły regenerator do komory ciepłej V . Przetłoczenie gazu odbywa się dzięki ruchowi ciepłego 2 tłoka w górę. W trakcie przejścia przez regenerator 8 gaz ogrzewa się, a następnie osiąga temperaturę T_o w wymienniku 9. Ponieważ do gazu doprowadzane jest ciepło, jego ciśnienie wzrasta w całej chłodziarce (przemiana a-b na wykresach $p-v$).

Etap II-III. W trakcie przemiany II-III tłok ciepły 2 pozostaje nieruchomy, podczas gdy tłok zimny 3 przetłacza gaz ze znajdującej się pod nim komory pośredniej V_{im} do komory zimnej V_o . W trakcie przepływu przez regenerator gaz oziębia się i ciśnienie w całej chłodziarce spada. Gaz, który przepłynął do komory zimnej zaczyna odbierać ciepło od kriostatowanego obiektu (przemiana b-c na wykresach $p-v$).

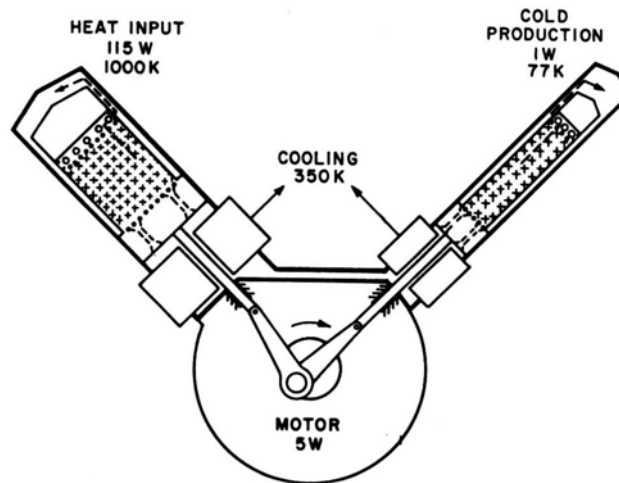
Etap III-IV. Przy nieruchomym zimnym tłoku 3, tłok ciepły 2 przesuwa się w dolne martwe położenie i powoduje przepływ gazu do komory pośredniej. W trakcie przepływu przez regenerator 8 temperatura gazu obniża się, dalszy spadek temperatury zachodzi w wymienniku 7 przez wymianę ciepła z otoczeniem. Ciśnienie w całej chłodziarce spada i w efekcie następuje ekspansja gazu w komorze zimnej V_o , w której temperatura obniża się (przemiana c-d). Gaz pozostały w komorze zimnej odbiera ciepło Q od kriostatowanego obiektu.

Etap IV-I. W ostatniej fazie pracy chłodziarki tłok 2 ciepły przesuwa się w górne martwe położenie powodując przepływ gazu przez regenerator 6 do komory pośredniej V_{im} i jego ogrzanie. Temperatura gazu wzrasta do wyrównania z temperaturą pośredniego źródła ciepła T_o , natomiast ciśnienie w chłodziarce wzrasta (przemiana d-a).

Teoretycznie chłodziarka Vuilleumiera-Taconisa nie wymaga doprowadzania mocy mechanicznej i raz puszczona w ruch nie powinna się zatrzymać. W praktyce tłoki muszą pokonać opory przepływu gazu przez regeneratory oraz w chłodziarce występują straty związane z tarciami elementów mechanicznych. Stąd konieczne jest wyposażanie chłodziarek w niewielkie silniki podtrzymujące jedynie ruch tłoków.

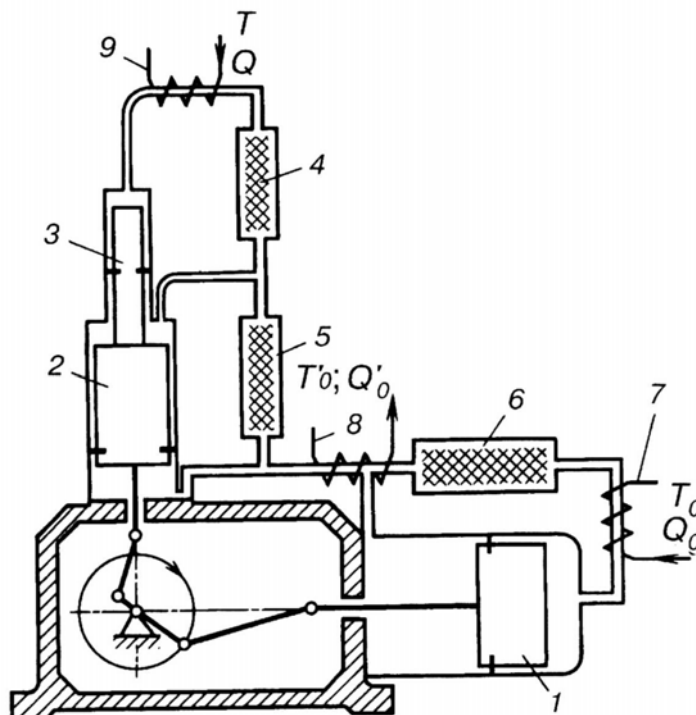
Temperatura T_o zależy od rodzaju wysokotemperaturowego źródła ciepła i z reguły wynosi 500 - 1200 K. Stosunek sprężania osiągany w chłodziarkach Vuilleumiera-Taconisa jest niewielki i w zasadzie nie przekracza 1,2. Ze względu na niski stosunek sprężania w chłodziarkach tego typu (wielostopniowych) nie udało się uzyskać temperatury niższej od 15 K.

W praktyce chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa buduje się w ten sposób, że tłoki poruszają się harmonicznym. Przykładowy schemat konstrukcyjny chłodziarki z harmonicznym ruchem tłoków pokazano na rysunku 3. Regeneratory są umieszczone wewnątrz tłoków co znacznie upraszcza budowę chłodziarki. Niewielki silnik elektryczny utrzymuje jedynie ruch tłoków, natomiast sprężanie gazu odbywa się przez wymianę ciepła.



Rysunek 3. Schemat konstrukcyjny chłodziarki z harmonicznym ruchem tłoków.

Chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa budowane są również w wersji wielostopniowej, wyposażone w wiele tłoków i regeneratorów - rysunek 4.



Rysunek 4. Schemat chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa z trzema tłokami; 1, 2, 3 - ciepły, pośredni i zimny tłok, 4, 5, 6 - ciepły, pośredni i zimny regeneratory, 7, 8, 9 - wymienniki ciepła.

Zaletą chłodziarek Vuilleumiera-Taconisa jest ich niezawodność wynikająca z niewielkich obciążeń mechanicznych działających na mechanizm napędowy, łożyska i uszczelnienia. Jednak o wykorzystaniu tych chłodziarek np. w programach kosmicznych zdecydowała możliwość wykorzystania źródła ciepła, a nie energii elektrycznej lub mechanicznej, do wytwarzania mocy chłodniczej. Energia cieplna może być np. zogniskowaną energią słoneczną, energią radioizotopów, ciepłem spalania paliw i odpadów. To właśnie zdolność do wykorzystania energii słonecznej i pochodzącej z reakcji jądrowych spowodowała, że NASA zainteresowała się w latach 60- tych XX wieku patentami Vuilleumiera i Taconisa. Wydaje się również, że chłodziarki Vuilleumiera-Taconisa wykorzystujące energię słoneczną mogą być bardzo atrakcyjne w systemach klimatyzacyjnych. W wielu miejscach klimatyzacja staje się potrzebna jedynie przy silnym nasłonecznieniu. Zamiast więc wykorzystywać energię słoneczną do wytwarzania energii elektrycznej (np. w ogniwach fotowoltaicznych), korzystna jest jej bezpośrednia konwersja na moc chłodniczą w klimatyzatorach.