

Chłodziarki z regeneracyjnymi wymiennikami ciepła – ciąg dalszy

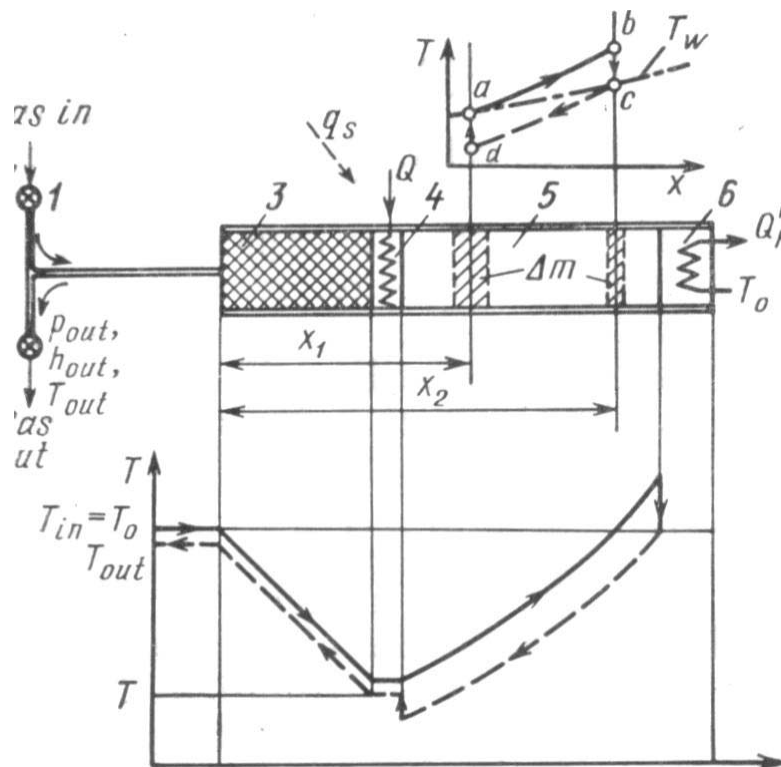
7.3. Rura pulsacyjna.

W roku 1964 Gifford i R. Longsworth zaproponowali chłodziarkę, której zasada działania opiera się na wykorzystaniu nierównowagowego procesu wypływu swobodnego z zamkniętej rury na wylocie z której znajduje się regenerator. Ze względu na cykliczny charakter zachodzących w niej procesów rurę taką nazwano rurą pulsacyjną.

Schemat chłodziarki z rurą pulsacyjną w wersji zaproponowanej przez Gifforda i Longswortha pokazano na rysunku 1.

Chłodziarka składa się z systemu zasilania gazem roboczym w skład którego wchodzi zawór wlotowy 1 i zawór wylotowy 2 oraz z rury pulsacyjnej. Na wlocie do rury pulsacyjnej umieszczony jest regenerator 3, za regeneratorem znajduje się niskotemperaturowy wymiennik ciepła 4. Za wymiennikiem ciepła znajduje się pusty odcinek rury 5 i zakończony wysokotemperaturowym wymiennikiem ciepła 6. Odległość pomiędzy dwoma wymiennikami 4 i 6 wynosi kilka do kilkunastu średnic rury.

Zasada pracy chłodziarki jest następująca:



Rys. 1. Jednostopniowa rura pulsacyjna: schemat i rozkład temperatury wzdłuż rury; 1 – zawór wlotowy, 2 – zawór wylotowy, 3 – regenerator, 4 – niskotemperaturowy wymiennik ciepła, 5 – wolna przestrzeń rury pulsacyjnej, 6 – wysokotemperaturowy wymiennik ciepła.

Po otwarciu zaworu wlotowego 1 gaz o temperaturze otoczenia T_o przepływa przez regenerator 3, gdzie jego temperatura obniża się – porównaj rysunek. Następnie gaz mija niskotemperaturowy wymiennik ciepła i zaczyna być sprężany przez kolejną porcję gazu

dopływającego do regeneratora. Jeżeli w rurze nie zachodzi mieszanie się gazu, to w trakcie sprężania gaz przesuwa się w kierunku ciepłego końca rury, a jego temperatura rośnie osiągając w pobliżu wysokotemperaturowego wymiennika ciepła 6 (chłodnicy) wartość wyższą od temperatury otoczenia. Po zakończeniu procesu napełniania gaz, którego temperatura przekroczyła temperaturę otoczenia oziębia się do tej temperatury oddając do chłodnicy 6 ciepło Q' . Teraz otwiera się zawór wylotowy 2 i następuje swobodny wypływ gazu, któremu również nie towarzyszy mieszanie gazu w rurze. W efekcie temperatura i ciśnienie gazu spadają. Pod koniec okresy wypływu gazu z rury temperatura gazu przy niskotemperaturowym wymienniku ciepła osiąga wartość niższą niż w trakcie napełniania rury i możliwe jest odebranie ciepła od chłodzonego obiektu. Ilość ciepła, która może zostać odebrana od chłodzonego obiektu wynika z zasady zachowania energii napisanej dla cyklu pracy rury pulsacyjnej i jest równa:

$$Q = Q' - \dot{G}(h_{in} - h_{out}) - Q_s \quad (1)$$

gdzie: Q jest wydajnością chłodniczą chłodziarki [W], Q' jest ilością ciepła przekazanego do otoczenia przez wysokotemperaturowy wymiennik ciepła [W], h_{in} i h_{out} oznaczają entalpie na wlocie i wylocie z rury, Q_s oznacza straty ciepła [W].

Istotą działania rury pulsacyjnej są procesy nierównowagowego sprężania i rozprężania gazu prowadzące do powstania wzdłuż rury gradientu temperatury. Przy założeniu, że w trakcie sprężania nie następuje mieszanie gazu, wzdłuż rury powstaje gradient temperatury. Aby w rurze nie następowało mieszanie się gazu, przepływ w niej nie powinien być silnie turbulentny. Średnica oraz przepływ masowy gazu przez rurę (i wynikająca z niego częstotliwość pracy rury) powinny być tak dobrane, aby przepływ wzdłuż rury był możliwie zbliżony do laminarnego, tzn. liczba Reynoldsa nie przekraczała krytycznej wartości równej około 2200.

Powstanie gradientu temperatury wzdłuż osi rury pozwala na oddanie ciepła do otoczenia, przy zachowaniu niskiej temperatury bezpośrednio za regeneratorem. Mechanizm prowadzący do transportu ciepła z zimnego do ciepłego końca rury może być opisany rozważając mały element gazu oznaczony Δm i początkowo znajdujący się w odległości x_1 od początku rury (rysunek 1). Podczas napełniania ilość gazu Δm podlega sprężeniu i jednoczesnemu przesunięciu do położenia x_2 . Przy założeniu, że proces sprężania zachodzi adiabatycznie, temperatura gazu w punkcie x_2 jest wyższa od temperatury w punkcie x_1 . Jeżeli gaz jest gazem doskonałym, to wzrost temperatury opisuje równanie 2:

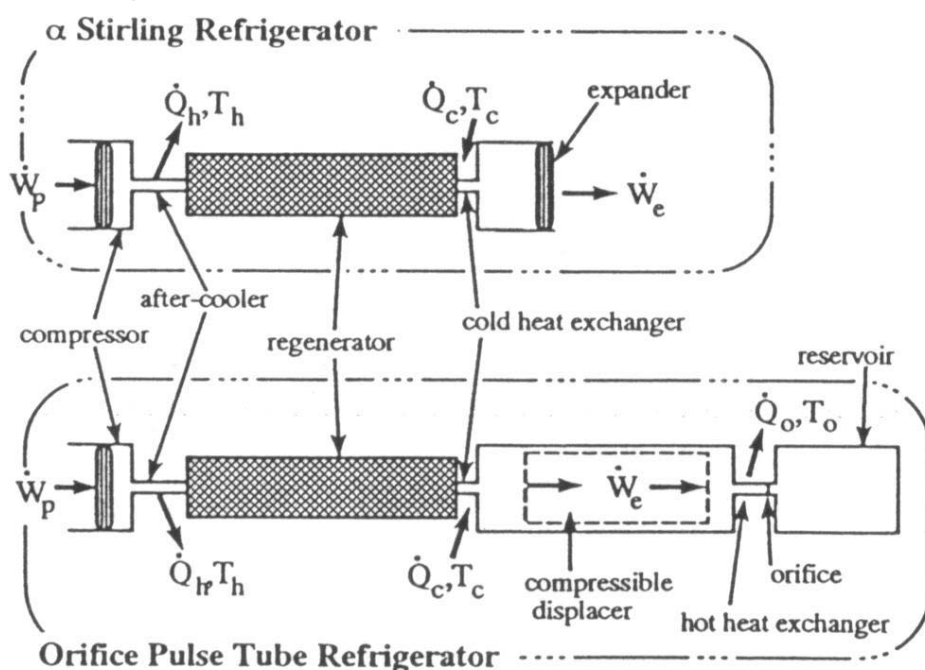
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{x_2}{x_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (2)$$

Proces sprężania może być uważany za adiabatyczny, jeżeli zachodzi odpowiednio szybko, a przepływ gazu w rurze nie jest turbulentny. Dalej zakłada się, że nie ma wymiany ciepła pomiędzy gazem i ścianką rury, a jedynie zachodzi przekazywanie ciepła do otoczenia w chłodnicy w okresie, kiedy oba zawory są zamknięte. W trakcie wypływu gazu z rury zachodzą procesy odwrotne, to znaczy następuje adiabatyczne rozprężanie gazu i obniżenie jego temperatury.

Najniższe temperatury jakie uzyskano w rurach pulsacyjnych w wersji pokazanej na rysunku 1 były równe około 150 K i z tego powodu rury pulsacyjne w tej postaci nie zostały uznane za

rozwojowe. Dopiero w roku 1984 Mikulin zaproponował rurę pulsacyjną wyposażoną w dyszę i dodatkowy zbiornik buforowy umieszczone na ciepłym końcu chłodziarki. Zbiornik buforowy powinien być na tyle duży, aby panujące w nim ciśnienie mogło być traktowane jako stałe.

Rura pulsacyjna w wersji z dyszą i zbiornikiem jest pokazana na rysunku 2.



Rysunek 2. Rura pulsacyjna z dyszą (dół rysunku) oraz porównanie z chłodziarką Stirlinga (górną część rysunku).

W rurze pulsacyjnej z dyszą i zbiornikiem wyrównawczym następuje przetłoczenie części gazu do zbiornika, przy czym praca \dot{W}_e tego przetłoczenia jest w całości rozproszona na ciepło \dot{Q}_o . Rura pulsacyjna z dyszą i zbiornikiem buforowym jest podobna do chłodziarki Stirlinga, z tą różnicą, że w przeciwieństwie do chłodziarki Stirlinga nie zachodzi w niej oddanie pracy \dot{W}_e na zewnątrz, a jedynie jej rozproszenie w postaci ciepła \dot{Q}_o – porównaj rysunek 2.

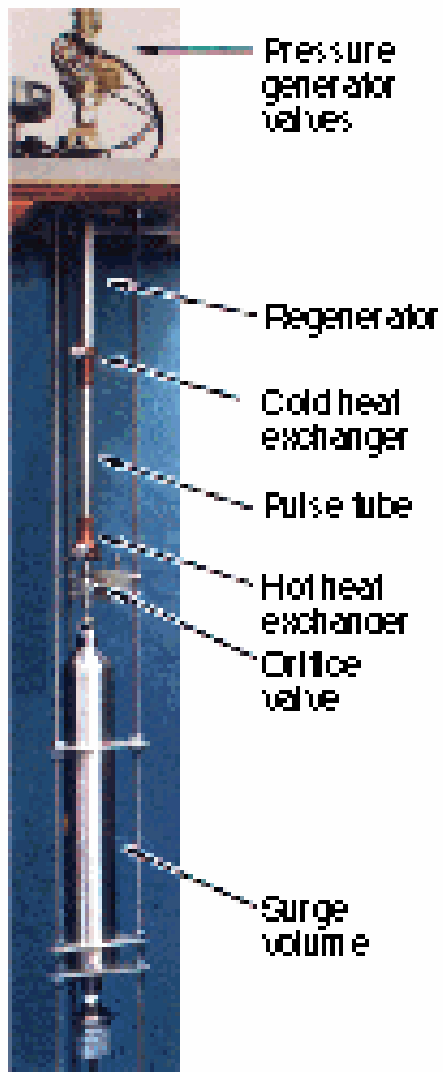
Przy założeniu, że gazem roboczym w chłodziarce pokazanej na rysunku 2 (dół) jest gaz doskonały uzyskuje się:

$$\dot{W}_p = \dot{Q}_h \quad , \quad \dot{Q}_c = \dot{Q}_o \quad , \quad \dot{S}_c = \dot{S}_h \quad (3)$$

gdzie: \dot{W}_p - praca izotermicznego sprężenia gazu doskonałego równa ciepłu sprężenia \dot{Q}_h . Entropia doprowadzona do chłodziarki z ciepłem \dot{Q}_c musi zostać oddana do otoczenia wraz z ciepłem \dot{Q}_h . Nie zachodzi natomiast transport entropii od niskotemperaturowego wymiennika ciepła w kierunku ciepłego końca chłodziarki, gdyż dopiero w trakcie przepływu gazu przez dyszę następuje rozproszenie pracy \dot{W}_e na ciepło \dot{Q}_o . Z równań (3) wynika efektywność rury pulsacyjnej:

$$\frac{Q_c}{W_p} = \frac{T_c}{T_h} \quad (4)$$

Rury pulsacyjne należą do najintensywniej rozwijanych gazowych chłodziarek kriogenicznych.



Pulse-Tube Refrigerator