

dr inż. Janusz EICHLER
dr inż. Jacek KASPERSKI

Zakład Chłodziactwa i Kriogeniki ITCiMP Politechniki Wrocławskiej

KONCEPCJA URZĄDZEŃ CHŁODNICZYCH WYKORZYSTUJĄCYCH POLE SIŁ ODŚRODKOWYCH.

W analizie koncepcyjnej urządzeń chłodniczych przyjmujemy za oczywiste ich działanie w statycznym polu sił grawitacyjnych Ziemi. Założenie to jest oczywiste poprzez doświadczenia praktyki inżynierskiej a przez to nieuświadomione i staje się widoczne dopiero wówczas, gdy rozważa się działanie urządzenia chłodniczego w warunkach innych, niż przy stałym gradiencie pola grawitacyjnego.

W Zakładzie Chłodziactwa i Kriogeniki Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej podjęto prace koncepcyjne i projektowe, zmierzające do zastąpienia statycznych urządzeń chłodniczych, wykorzystujących w swoim działaniu pole grawitacyjne Ziemi, urządzeniami wirującymi, wykorzystującymi pole sił odśrodkowych do realizacji obiegu chłodniczego.

W typowym urządzeniu chłodniczym czynnik roboczy - ziębnik w trakcie realizacji zamkniętego cyklu przemian termodynamicznych ma za zadanie „zasysać” ciepło od ziębionego obiektu na poziomie wymaganej temperatury t_o (zwykle jest to połączone z procesem parowania) a następnie „wytlaczać” ciepło do otoczenia na poziomie temperatury t_k (zwykle połączone z procesem skraplania). Powstające w ten sposób pole temperaturowe $t_k - t_o$ wyznacza w przestrzeni termodynamicznej usytuowanie poszczególnych przemian obiegu.

W zależności od rodzaju przyjętego ziębnika, pole temperaturowe $t_k - t_o$ determinuje rozkład ciśnień w urządzeniu chłodniczym $p_k - p_o$. Pamiętając o tym, że urządzenie chłodnicze pracuje w statycznym polu sił grawitacyjnych Ziemi, można posługując się tymi siłami, zbudować urządzenie, w którym wykorzystane zostaną naturalne sposoby zachowania się płynów: *cieczy* - dążącej do wypełnienia dolnej, najniższej, dostępnej części urządzenia i *pary* - dążącej do wypełnienia całej przestrzeni ponad cieczą.

W urządzeniu tym (rys.1), wymagane przez pole temperaturowe $t_k - t_o$ - pole ciśnień $p_k - p_o$, uzyskane jest przez odpowiednie usytuowanie wymienników ciepła w polu grawitacyjnym tak, że parowacz umieszczony jest powyżej skraplacza o wysokość H , odpowiadającą ciśnieniu hydrostatycznemu słupa cieczy ziębnika, równoważną różnicy ciśnień $p_k - p_o$. Wydzielana w parowaczu para przetłaczana jest do skraplacza przez sprężarkę mechaniczną napędzaną silnikiem.

Innym sposobem na przetłaczanie pary pomiędzy parowaczem a skraplaczem jest zastosowanie tzw. „sprężarki termicznej”, której uproszczony schemat przedstawiono na rys.2. W urządzeniu tym, w miejsce sprężarki mechanicznej zastosowano zespół aparatów: absorber - oddzielnik cieczy z pompą termosyfonową - desorber oraz drugi czynnik roboczy, którego zadaniem jest pochłanianie pary ziębnika, przez co powstaje ciekły roztwór. Ciekły roztwór cyrkuluje pomiędzy absorberem a desorberem dzięki wykorzystaniu sił pola grawitacyjnego oraz wspomaganie przez termosyfon. W urządzeniu o działaniu grawitacyjnym absorber musi być usytuowany powyżej desorbera o wysokość, wynikającą z niezbędnego rozkładu ciśnień hydrostatycznych. W absorberze para z parowacza jest „zasysana” - absorbowana przez ciekły roztwór, który pod wpływem sił ciężkości spływa samoczynnie do niżej umieszczonego desorbera. W desorberze, na skutek doprowadzenia

ciepła napędowego Q_d , następuje „wytłoczenie” pary, poprzez oddzielacz, do skraplacza, gdzie kondensuje się przy wymaganej temperaturze t_k . Następnie ciekły ziębnik wypierany jest do parowacza, umieszczonego powyżej skraplacza o wymaganą wysokość H .

Forma geometryczna takich urządzeń zależy od właściwości czynnika (ziębnika, roztworu roboczego). W tabl.1 przedstawiono porównanie wymaganego rozkładu ciśnień i wysokości H dla wybranych, uniwersalnie stosowanych w różnych typach urządzeń, ziębników przyjmując, jako punkty odniesienia, arbitralnie wybrane temperatury: parowania $t_o = 0^\circ \text{C}$ i skraplania $t_k = 40^\circ \text{C}$.

Już ze wstępnej analizy danych z tabl.1 wynika duże zróżnicowanie wymaganej wysokości H dla wybranych ziębników pod kątem ich wykorzystania w układzie grawitacyjnym. Technicznie uzasadnione jest stosowanie np. H_2O w roztworze z LiBr w układzie absorpcyjnym grawitacyjnym jak na rys.2 ($H=0,69\text{m}$) a wręcz nierealne jest zastosowanie w takim układzie np. NH_3 w roztworze z H_2O ($H=195\text{m}$).

Zastosowanie ogólnie znanego rozwiązania sprężarki mechanicznej i elementów dławiących (rys.3), niweluje niedogodności występujące w układzie grawitacyjnym, uniezależniając formę geometryczną układu od wpływu pola grawitacyjnego i pozwalając na dużą swobodę we wzajemnym przestrzennym usytuowaniu wymienników ciepła układu. W układach tych można swobodnie stosować ziębniki takie jak NH_3 , R22, R290 i podobne, wykorzystując ich pozytywne właściwości termodynamiczne.

Podobnie uniezależniające od wpływu pola grawitacyjnego działanie posiada układ absorpcyjny pompowy, przedstawiony na rys.4. W miejsce sprężarki mechanicznej, napędzanej silnikiem elektrycznym, zastosowano tu „sprężarkę termiczną” napędzaną ciepłem napędowym, pochodzącym np. z utylizacji ciepła odpadowego. Rolę „sprężarki” spełnia tu zespół współdziałających cieplnie z otoczeniem aparatów: absorber - desorber, połączonych ze sobą armaturą zawierającą mechaniczną pompę cieczową. W układzie tym zastosowano drugi czynnik, mniej lotny, tworzący wraz z ziębnikiem roztwór roboczy. Para powstała w parowaczu jest absorbowana (na poziomie ciśnienia p_o) przez ciekły roztwór ubogi w absorberze a powstały w ten sposób roztwór bogaty jest wtłaczany przez pompę mechaniczną do desorbera. W desorberze, na skutek doprowadzania strumienia ciepła napędowego Q_d , następuje desorpcja pary ziębnika z roztworu na poziomie ciśnienia p_k . Para ta kierowana jest do skraplacza, gdzie ulega skropleniu, a roztwór ubogi w ziębnik, poprzez element dławiący, powraca do absorbera zamykając swój obieg. W urządzeniu tym energia napędowa doprowadzana jest na sposób ciepła. Omijając niedogodności statycznego układu grawitacyjnego (rys.2), można tu wykorzystać korzystne właściwości takich roztworów, jak: $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ i $\text{R22} + \text{E181}$.

Osobną klasę urządzeń absorpcyjnych, w których można zastosować ziębniki nieprzydatne w statycznym układzie grawitacyjnym (według rys.2), są układy absorpcyjno-dyfuzyjne. W układach tych wymaganą różnicę ciśnień $p_k - p_o$ uzyskuje się przez wykorzystanie właściwości trzeciego, zastosowanego czynnika, tzw. gazu obojętnego.

Na rys.5 przedstawiono schemat uproszczonego grawitacyjnego urządzenia absorpcyjno-dyfuzyjnego, w którym wprowadzenie gazu obojętnego w odrębny obieg pomiędzy parowaczem i absorberem powoduje, że w hermetycznym układzie ciśnieniowo zrównoważonym, ciśnienie skraplania p_k równe jest ciśnieniu całkowitemu w układzie a ciśnienie parowania p_o ziębnika w parowaczu równe jest ciśnieniu cząstkowemu pary ziębnika w mieszaninie z gazem obojętnym. Stan taki sprawia, że skraplacz umieszczony jest nad parowaczem jedynie o taką wysokość H_{ad} , która zapewni grawitacyjny przepływ kondensatu ze skraplacza do parowacza, uniemożliwiając równocześnie przedostawanie się gazu obojętnego do skraplacza (zamknięcie cieczowe). Cyrkulacja ciekłego roztworu pomiędzy desorberem i absorberem odbywa się dzięki odpowiedniej geometrii tych aparatów,

umożliwiającej swobodny spływ grawitacyjny, wspomagany pracą pompy termosyfonowej, napędzanej ciepłem napędowym. Statyczne pole grawitacyjne ma tu decydujący wpływ na cyrkulację gazowej mieszaniny ziębniaka i gazu obojętnego pomiędzy parowaczem i absorberem i dlatego od prawidłowej geometrii tego obiegu zależą parametry termodynamiczne całego urządzenia.

Analizując drogę, jaką prowadzono czytelnika od grawitacyjnego urządzenia sprężarkowego z rys.1 do grawitacyjnego urządzenia absorpcyjno-dyfuzyjnego z rys.5 starano się pokazać jak silnym elementem warunkującym poprawną pracę układu, jest współistniejące z nim naturalne pole grawitacyjne Ziemi. Uświadomienie sobie „osadzenia” pracy urządzenia chłodniczego na tle tego pola obrazuje symbolicznie rys.6. Prostokątem oznaczono na nim urządzenie chłodnicze realizujące obieg lewobieżny pomiędzy temperaturami t_o i t_k na tle pola przyspieszeń, symbolizowanego przez wektor przyspieszenia ziemskiego g . Minimalny wymiar geometryczny urządzenia o napędzie grawitacyjnym zależy tu wyłącznie od wartości przyspieszenia g i rodzaju zastosowanego czynnika obiegowego, co opisać można zależnością (1):

$$H_{\min} = f (g , \text{rodzaj czynnika}) \quad (1)$$

Warto zauważyć, że pole naturalnego przyspieszenia ziemskiego jest polem jednorodnym (co wynika ze stosunku rozmiarów urządzenia do kuli ziemskiej) i posiada przybliżoną wartość $g \sim 9,81 \text{ m/s}^2$, na którą praktycznie nie można oddziaływać. Jednorodność i stałość pola grawitacji ziemskiej powoduje, że jedynym ze sposobów pokonania ograniczeń jakie ono narzuca jest tylko i wyłącznie trafny dobór czynnika chłodniczego. Wyniki przeliczeń zamieszczonych w tabeli 1 pokazują, że nawet przy najbardziej zasadnie przeprowadzonym doborze czynnika ograniczenie wymiarowe H_{\min} jest jednak ograniczeniem konstrukcyjnie znaczącym.

Jednym ze sposobów przekroczenia skończonej wartości przyspieszenia g wydaje się być, wspomniane już na początku artykułu, zastąpienie naturalnego pola grawitacji ziemskiej przez pole przyspieszeń odśrodkowych sztucznie wytworzonego do tego celu ruchu wirowego. Pracę chłodziarki typu grawitacyjnego w takim polu zobrazowano symbolicznie na rys. 7. Warto zauważyć, że pole to nie jest ścisłym odpowiednikiem pola grawitacyjnego albowiem wielkość przyspieszenia odśrodkowego zależy tu liniowo od odległości od osi obrotu oraz (oczywiście) prędkości obrotowej ω , jak wynika to z wzoru (2):

$$a = r * \omega \quad (2)$$

Otrzymywane pole przyspieszeń odśrodkowych jest więc co prawda jakościowo nowym polem niejednorodnym, osiowo-symetrycznym, ale, co ważniejsze, otrzymane wartości przyspieszenia mogą teraz bez trudu przekroczyć skończoną wartość przyspieszenia ziemskiego ($a \gg g$). W analogi do wzoru (1), zdefiniować można minimalny wymiar geometryczny R_{\min} , zasadny dla urządzenia pracującego w ruchu wirowym:

$$R_{\min} = f (\omega , \text{rodzaj czynnika}) \quad (3)$$

Wymiar R_{\min} warunkuje więc rozmiary urządzenia chłodniczego poddanego ruchowi obrotowemu w taki sam sposób, w jaki wymiar H_{\min} warunkuje rozmiary stacjonarnego urządzenia chłodniczego typu grawitacyjnego.

Ruch wirowy układu chłodziarki grawitacyjnej wokół wybranej osi obrotu (rys.7) wyrazić można zastępczo poprzez sekwencję pozycji zajmowanych kolejno przez chłodziarkę wokół tej osi (rys.8). Można także wyobrazić sobie zespół niezależnych, lub nawet połączonych ze sobą chłodziarek wirujących wspólnie wokół osi symetrii (rys.8), a wybiegając myślą jeszcze dalej, osiowo-symetryczne, wirujące urządzenie chłodnicze w kształcie walca (rys.9). Urządzenie takie będąc hermetycznym i monolitycznym blokiem realizowałoby obieg lewobieżny pomiędzy wysokotemperaturowym źródłem ciepła (t_k) na jednym z końców, a niskotemperaturowym źródłem ciepła (t_o) na drugim. Urządzenie wirujące tego typu określałyby cztery podstawowe parametry techniczne jego pracy :

- 1) prędkość ruchu obrotowego ω [rad/s],
- 2) minimalny rozmiar geometryczny R_{\min} [m],
- 3) sposób realizacji obiegu chłodniczego wewnątrz monolitu,
- 4) rodzaj zastosowanego czynnika obiegowego.

Spośród wielu różnych możliwych sposobów wytworzenia ruchu obrotowego urządzenia chłodniczego z rys.9, rozwiązaniem najbardziej realnym technologicznie wydaje się być oczywiście zastosowanie silnika elektrycznego. Prędkości obrotowe osiągnane przez silniki tego typu zawierają się zazwyczaj w przedziale od około 600 do ok. 6000 obr/min, a wobec tego interesujące byłoby wyliczenie minimalnej wielkości R_{\min} urządzenia wirującego dla kilku wybranych prędkości (np. dla 700, 1400 i 5600 obr/min). Wyniki takiego przeliczenia zamieszczono w dolnej części tabeli 1. Co ciekawe, już dla najbardziej niekorzystnego przypadku (NH_3 , 700 obr/min) dałoby się jednak zbudować realne urządzenie o średnicy $\sim 1,5\text{m}$, wszakże przy wyjątkowo trafnym doborze czynnika (H_2O , 5600 obr/min) otrzymać można byłoby urządzenie o szczególnie niewielkich rozmiarach $\sim 10\text{mm}$ (napełnione dodatkowo czynnikiem jak najbardziej ekologicznym !).

Praca urządzenia chłodniczego typu grawitacyjnego w polu przyspieszeń odśrodkowych pozwoliłaby więc stworzyć hermetyczne, monolityczne, wirujące urządzenie chłodnicze o niewielkich rozmiarach i swoistej, niespotykanej jak dotąd osiowo-symetrycznej konstrukcji. Urządzenie tego typu, współpracowałoby z bezpośrednio otaczającymi je lub doprowadzonymi mediami (źródłami ciepła) poprzez brzegowo lub stycznie usytuowane wymienniki ciepła o specjalnie dobranej konstrukcji. Obieg czynnika roboczego wewnątrz monolitu wynikałoby tu zarówno z oddziaływania sił odśrodkowych jak i dodatkowych oddziaływań cieplnych (w analogiczny sposób jak dzieje się to w urządzeniach grawitacyjnych - przykładowo w urządzeniu absorpcyjno-dyfuzyjnym poprzez oddziaływanie pola grawitacyjnego i doprowadzenie energii cieplnej do pompy termosyfonowej i desorbera).

Realizowanie pracy urządzenia chłodniczego typu grawitacyjnego w polu przyspieszeń odśrodkowych, jak starano się pokazać przedstawiając powyższe rozważania, pozwoliłoby stworzyć zupełnie nową klasę wirujących urządzeń chłodniczych o niewielkich rozmiarach, swoistym sposobie działania i osiowo-symetrycznej konstrukcji. Prognozując ogólnie pozytywne efekty wynikające z rozwijania koncepcji urządzeń tego typu, wydaje się, że zadaniem najistotniejszym w chwili obecnej byłoby racjonalne rozpoznanie naukowe specyfiki podstawowych zjawisk zachodzących w polu sił odśrodkowych, w tym m.in. przemian fazowych czynnika (wrzenie, skraplanie), procesów desorpcji i absorpcji w roztworach, procesu dławienia czynnika, procesu pompowania termosyfonowego, wpływu sił Coriolisa na rozplływ czynnika, niestabilności wyważenia mechanicznego układu wirującego, itp.. Tematy te stanowiąc jak dotąd obszar mało rozpoznany naukowo; zakreślają zarazem dziedzinę przyszłych prac badawczych autorów artykułu.

Tabela 1. Minimalne wymiary geometryczne obliczone dla przykładowych czynników chłodniczych.

Czynnik		H ₂ O	NH ₃	CH ₃ OH	R22	Propan	
Przykładowy roztwór		H ₂ O +LiBr	NH ₃ + H ₂ O	CH ₃ OH + LiBr	R22+E181	Propan +butan	
P _o (0°C)	kPa	0.61	444	3.95	517	500	
P _k (40°C)	kPa	7.37	1606	34.67	1599	1392	
ΔP = P _k - P _o	kPa	6.76	1162	30.72	1083	892	
ρ _e	kg/m ³	998	609	750	1209	498	
H	m	0.69	195	4.18	91.3	183	
R _{min} [m]	n=700	obr/min	0.044	0.72	0.11	0.50	0.28
	n=1400		0.022	0.36	0.054	0.25	0.14
	n=5600		0.005	0.09	0.014	0.07	0.04

Artykuł : Koncepcja urządzeń chłodniczych wykorzystujących pole sił odśrodkowych

Autorzy : dr inż. Jacek Kasperski
dr inż. Janusz Eichler

Streszczenie :

W artykule przedstawiono nową koncepcję zastąpienia typowych urządzeń chłodniczych sprężarkowych i absorpcyjnych, wykorzystujących do realizacji obiegu statyczne pole grawitacyjne Ziemi przez równoważne im urządzenie wirujące, wykorzystujące do realizacji obiegu pole sił odśrodkowych. Na wstępie przedstawiono przegląd typowych urządzeń z uwypukleniem w nich roli statycznego pola grawitacyjnego. Następnie dokonano przeliczenia minimalnych wymiarów geometrycznych takiego urządzenia dla najczęściej stosowanych czynników chłodniczych. Na tle tych wyliczeń wykazano możliwość zastąpienia urządzeń statycznych przez równoważne im urządzenia wirujące, pozwalające na znaczne zredukowanie niezbędnych wymiarów geometrycznych.

Słowa kluczowe :

chłodnictwo,
przyspieszenia odśrodkowe,
grawitacja,