

OCENA TECHNICZNO-EKONOMICZNA KASKADOWEGO SYSTEMU CHŁODZENIA OPARTEGO NA UKŁADZIE AMONIAK – DWUTLENEK WĘGLA

Część 1

inż. Daniel BAGIŃSKI

GRASSO Sp. z o.o.

dr inż. Zenon BONCA

Katedra Techniki Ciepłej

Politechnika Gdańska

WPROWADZENIE

Najstarszymi i powszechnie znanymi substancjami do odprowadzania ciepła są lód i śnieg. Już Chińczycy przed 5000 lat wiedzieli, że po dodaniu lodu do napojów chłodzi się je, i zarazem polepsza się ich smak. Jak podają różne źródła literaturowe, również w czasach Greków i Rzymian przynoszono z gór śnieg, który składowano w okrytych słomą dołach i wykorzystywano do celów chłodniczych. Zatem jak wynika z tego krótkiego zarysu historycznego, od wieków zapotrzebowanie na „zimno” wykorzystywane do przechowywania żywności, zaspokajane było wyłącznie poprzez środki pochodzące ze środowiska naturalnego. Stało się więc jasne, że chłodzenie pozwala utrzymywać przez dłuższy czas świeżość artykułów spożywczych. Impuls do dynamicznego rozwoju technik chłodzenia wywołała rewolucja przemysłowa, kiedy to rozwinęły się duże centra przemysłowe, a wraz z nimi zwiększyło się zapotrzebowanie na długoterminowe przechowywanie produktów żywnościowych w obniżonych temperaturach. Taki cel można było osiągnąć tylko przy pomocy tzw. **chłodnictwa przemysłowego**.

Po wielu latach technika chłodnicza powraca do swoich termodynamicznych korzeni, z których amoniak, a w obecnych czasach również i **dwutlenek węgla** ponownie stają się dominującymi płynami roboczymi. Przyczyną takiego stanu rzeczy są szkody, jakie środowisku naturalnemu wyrządzają powszechnie stosowane czynniki syntetyczne, wpływające na degradację warstwy ozonowej i pogłębiające tzw. „efekt cieplarniany”. W trosce o ochro-

nę warstwy ozonowej niektóre państwa podjęły już w latach 80-tych inicjatywę mającą na celu ograniczenie emisji do atmosfery tzw. gazów cieplarnianych, jak również substancji zawierających chlor. Zaowocowało to w 1985 roku podpisaniem tzw. Konwencji Wiedeńskiej, a następnie w roku 1987 **Protokołu Montrealskiego**, który jest pierwszą umową międzynarodową dotyczącą globalnej polityki związanej z ochroną środowiska, której celem jest zapobieganie problemom wynikającym ze stosowania substancji zubożających warstwę ozonową.

Innym powodem powrotu do stosowania dwutlenku węgla jest konieczność ograniczenia ilości amoniaku w przemysłowych instalacjach chłodniczych, oraz bezpieczeństwo przechowywanego produktu. Najlepszym rozwiązaniem byłoby ograniczyć obecność amoniaku tylko do obszaru maszynowni chłodniczej, gdzie można w łatwy sposób zastosować odpowiednie środki bezpieczeństwa. Jeżeli amoniak znajduje się tylko w maszynowni, wówczas ryzyko, że w razie wycieku dojdzie do skażenia składowanych produktów równa się praktycznie zero.

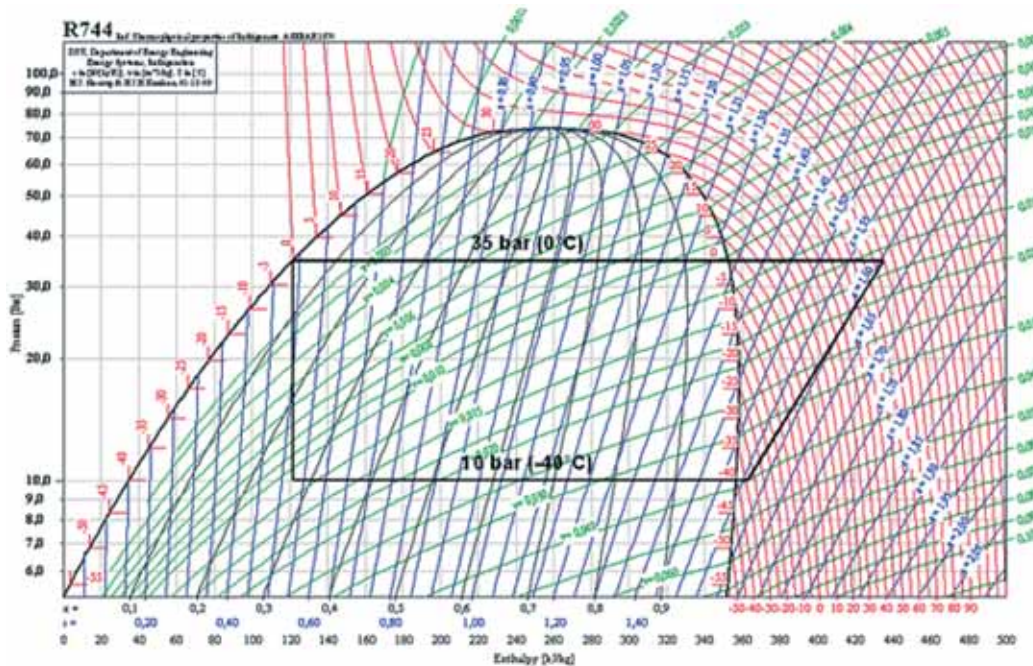
1. SYSTEMY CHŁODZENIA OPARTE NA CO₂ (R 744)

Jak wiadomo urządzenie chłodnicze stanowi układ zamknięty, w którym krąży określona ilość niskowrzącego płynu roboczego o odpowiednich właściwościach. Czynniki ten poddawany jest kolejno po sobie następującym przemianom termodynamicznym, dzięki czemu ciepło ze środowiska

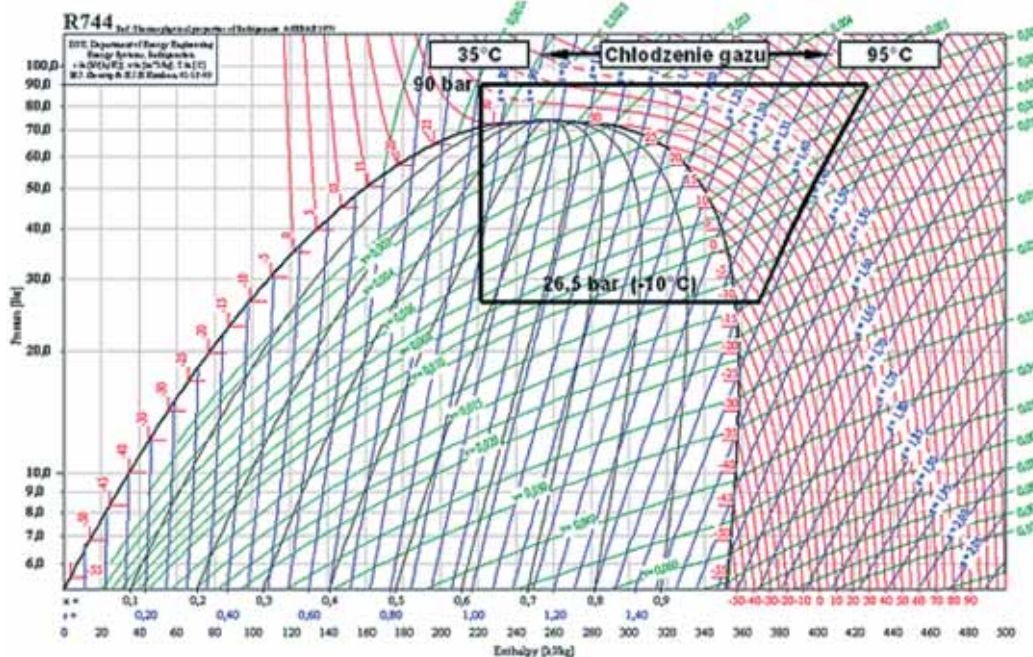
chłodzonego jest przenoszona do otoczenia. Po przejściu każdego cyklu przemian w urządzeniu, czynnik osiąga stan końcowy, identyczny ze stanem początkowym. Za każdym razem przepływa on przez połączone przewodami rurowymi podstawowe elementy składowe instalacji chłodniczej, którymi są: parownik, sprężarka, skraplacz oraz zawór rozprężny (dławiący).

Znając zatem przeznaczenie danego urządzenia chłodniczego, a co się z tym wiąże również i zakres temperatur jego pracy, można wybrać jeden z dwóch obiegów teoretycznych możliwych do zrealizowania, używając jako czynnika roboczego **dwutlenku węgla** [18], a są to:

- **obieg chłodniczy podkrytyczny**, którego zakres pracy mieści się w przedziale ciśnień od 5.7 bar (nieco powyżej punktu potrójnego) do 73 bar (nieco poniżej punktu krytycznego). Przekłada się to na następujący przedział temperaturowy od -55°C do 30°C . Realizowany jest on za pomocą prostych układów chłodniczych, lecz jak widać jest mało korzystny z powodu ograniczeń wynikających z temperatur i wysokich ciśnień (rys. 1.1). Zazwyczaj układy realizujące obieg podkrytyczny pracują w przedziale ciśnień od 5.7 bar do 35 bar. W przypadku, gdy chłodnice powietrza odszraniane są gorącym gazem, uzyskiwane ciśnienia pracy są wyższe o około 10 bar;
- **obieg chłodniczy transkrytyczny** (rys. 1.2) wykorzystywany jest w małych, komercyjnych układach chłodniczych, takich jak: klimatyzacja samochodowa (wypiera powoli czynnik R 134a z zastoso-



Rys 1.1 Podkrytyczny obieg chłodniczy (przykład 10/35 bar)



Rys 1.2 Transkrytyczny obieg chłodniczy - chłodzenie gazu

wania klimatyzacyjnego w samochodach), małe pompy ciepła, klimatyzacja komfortu (szczególnie popularny w Japonii) oraz układy chłodzenia w supermarketach (w 2000 roku przekazano do użytku pierwszy supermarket wyposażony w instalacje CO₂);

- **obieg dwustopniowy**, to wykorzystanie w układzie chłodniczym obu poprzednich obiegów teoretycznych (rys. 1.3).

Zazwyczaj jednak dla instalacji przemysłowych systemy CO₂ projektowane są jako kaskadowe, lub hybrydowe,

ponieważ pozwalają one ograniczyć ciśnienia robocze do takiego poziomu, przy którym wymagania dotyczące komponentów składowych instalacji, takich jak: sprężarki, układy sterowania, zawory; nieznacznie różnią się od wymagań stawianych instalacjom tradycyjnym.

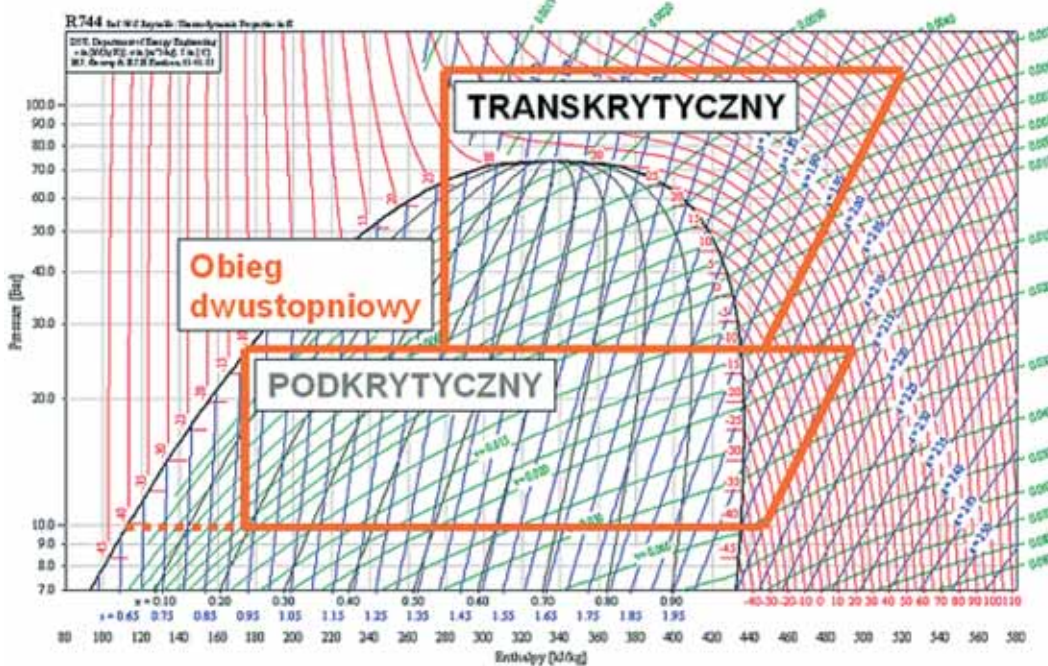
1.1 Przegląd rozwiązań systemów chłodzenia opartych na dwutlenku węgla

Instalacje CO₂ mogą być projektowane na różne sposoby, lecz najbardziej

popularne i najczęściej spotykane systemy, to:

- system z bezpośrednim odparowaniem czynnika chłodniczego w parowniku,
- system pompowy,
- system pośredni,
- systemy kombinowane.

Układy chłodzenia oparte na dwutlenku węgla stosowane w obiektach przemysłowych typu chłodnia składowa, konstruowane są w większości przypadków jako urządzenia kaskadowe łączące w sobie powyższe systemy.



Rys 1.3 Dwustopniowy obieg chłodniczy CO₂

Układ kaskadowy jest połączeniem ze sobą przynajmniej dwóch oddzielnych obiegów chłodniczych, przy czym skraplacz pierwszego stopnia jest w nich jednocześnie parownikiem kolejnego stopnia. Ciepło odbierane w parowniku z przestrzeni chłodzonej jest przekazywane do otoczenia za pośrednictwem kolejnego obiegu, stanowiącego następny stopień kaskady.

W każdym ze stopni kaskady może być realizowany zarówno obieg jedno-, jak i dwustopniowy, ponadto każdy ze stopni można napełnić innym rodzajem czynnika chłodniczego. Możliwość różnicowania czynników pozwala na dobór najbardziej odpowiedniego płynu roboczego do danego zakresu temperatur pracy, co stanowi jedną z najważniejszych zalet układów kaskadowych. Przemiany termodynamiczne zachodzące w dwustopniowym układzie kaskadowym przedstawia rysunek 1.4. Widoczne są na nim dwie pary krzywych granicznych, po jednej dla każdego czynnika. Jak widać, temperatura skraplania w dolnym stopniu przewyższa temperaturę parowania w górnym stopniu, co jest wynikiem założonego kierunku przekazywania ciepła [6].

1.1.1 System chłodzenia oparty na układzie kaskadowym NH₃ – CO₂ z dwutlenkiem węgla w części nisko-

temperaturowej

Układ chłodniczy niskotemperaturowy oparty na systemie kaskadowym z amoniakiem w górnym stopniu przedstawia rysunek 1.5. Jak widać, dolny stopień kaskady napełniony dwutlenkiem węgla jest systemem pompowym. W systemie tym ciekły CO₂ pompowany jest z oddzielacza ciekłego czynnika do chłodnicy powietrza, gdzie częściowo odparowuje zanim powróci z powrotem do oddzielacza. Pary czynnika zasysane są i sprężane w sprężarce CO₂, i skraplają się w kaskadowym wymienniku ciepła CO₂ – NH₃. Wymiennik ten jest skraplaczem dwutlenku węgla, i jednocześnie parownikiem amoniaku.

Często spotykaną modyfikacją tego typu rozwiązania technicznego, jest wykorzystywanie dodatkowej sprężarki dwutlenku węgla do odszraniania chłodnic powietrza gorącym gazem, co ilustruje rysunek 1.6.

Zalety:

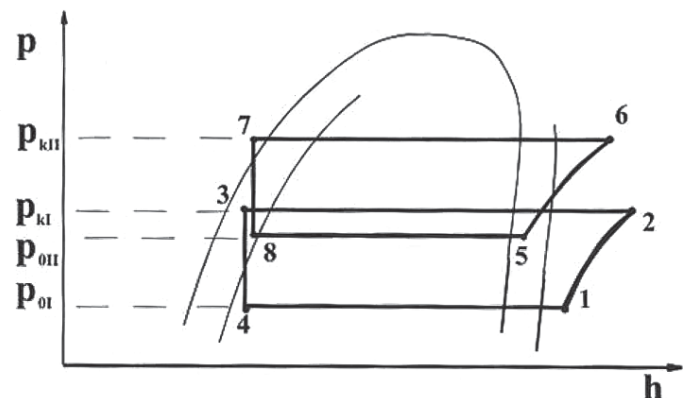
- + mała wartość czynnika

chłodniczego, w porównaniu z tradycyjnym układem amoniakalnym (napełnienie układu można zmniejszyć o około 1/10);

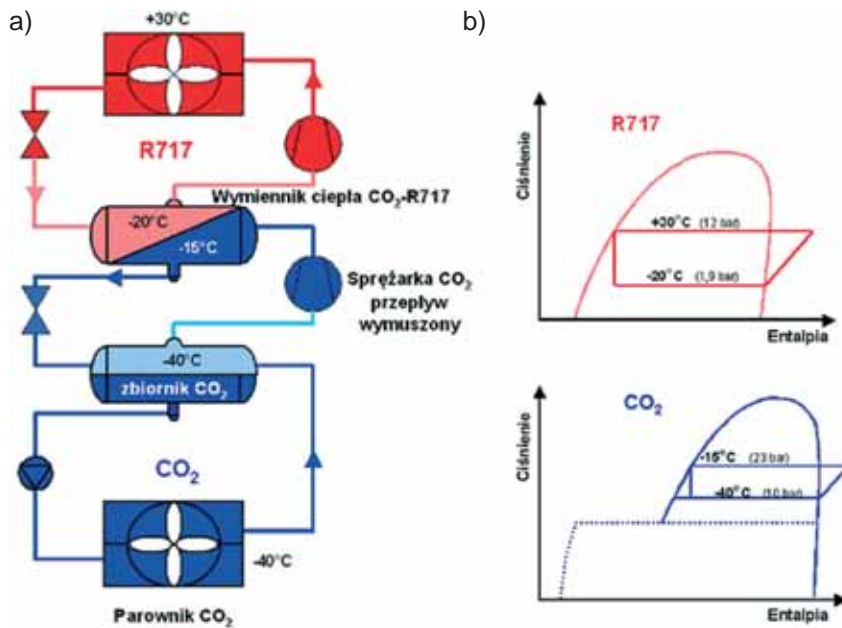
- + duża niezawodność ruchu;
- + dobra efektywność energetyczna, aczkolwiek gorsza niż w systemach bezpośrednich;
- + możliwość zastosowania różnych rodzajów czynników syntetycznych i naturalnych np.: NH₃, izobutanu, propanu;
- + objętość skokowa sprężarki CO₂ jest 10 razy mniejsza od odpowiedniej sprężarki niskiego stopnia NH₃.

Wady:

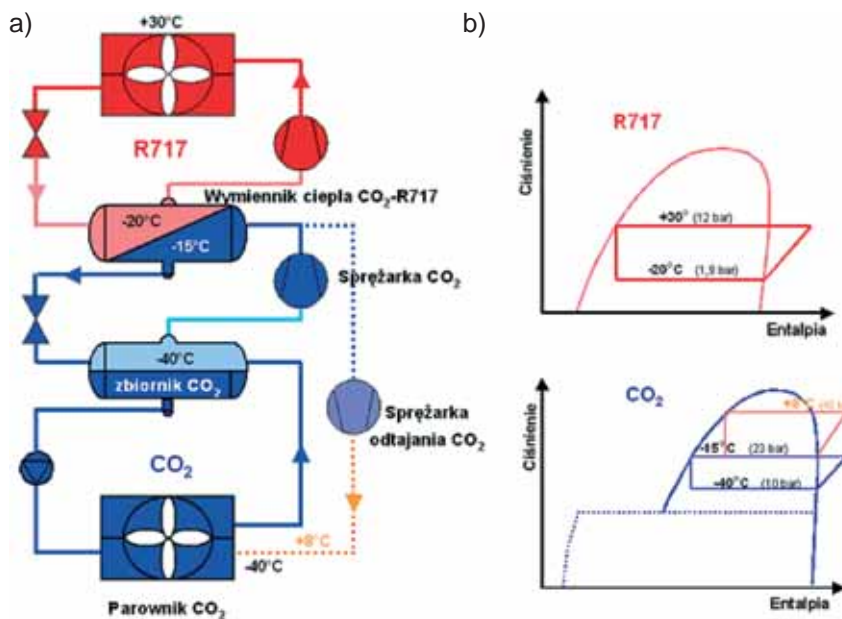
- dodatkowa energia niezbędna do napędu pomp;



Rys 1.4 Obieg obu stopni kaskady na wykresie p – h (każdy stopień napełniony jest innym czynnikiem chłodniczym).



Rys 1.5 Kaskadowy system chłodzenia w układzie amoniak – dwutlenek węgla [18]: a) schemat ideowy, b) przemiany termodynamiczne na wykresie p – h



Rys 1.6 Kaskadowy system chłodzenia w układzie amoniak – dwutlenek węgla z odtajaniem gorącym gazem CO₂ [18]: a) schemat ideowy, b) przemiany termodynamiczne na wykresie p – h

- większa sieć przewodów wymagających izolacji zimnochronnej;
- większa liczba sprężarek;
- konieczność stosowania dodatkowego urządzenia chłodniczego do utrzymania niskiej temperatury w oddzielaczu podczas postoju układu.

1.1.2. Pośredni system chłodzenia. Dwutlenek węgla jako czynnik pośredni w instalacji amoniaku

Pośredni system chłodzenia jest reali-

zowany przez dwa obiegi chłodnicze: obieg pierwotny i obieg wtórny. Obieg pierwotny często ograniczony jest do maszynowni chłodniczej, natomiast obieg wtórny realizuje chłodzenie komór chłodniczych. Oba obiegi są sprzęgnięte ze sobą poprzez parownik obiegu pierwotnego i ochładzacz chłodziwa obiegu wtórnego. W tym miejscu instalacji dokonuje się schładzanie czynnika wtórnego (chłodziwa) powracającego obiegiem wtórnym z odbiorników chłodu. Schemat ideowy

systemu pośredniego przedstawiono na rysunku 1.7.

W systemie tym ciekły CO₂ pompowany jest z oddzielacza ciekłego czynnika do chłodnicy powietrza, gdzie częściowo odparowuje zanim powróci z powrotem do oddzielacza. Pary CO₂ poprzez naturalny przepływ trafiają do wymiennika ciepła CO₂ – NH₃, w którym następuje proces skraplania. Wymiennik ciepła jest ochładzaczem dwutlenku węgla i jednocześnie parownikiem amoniaku.

Zalety pośredniego systemu chłodzenia:

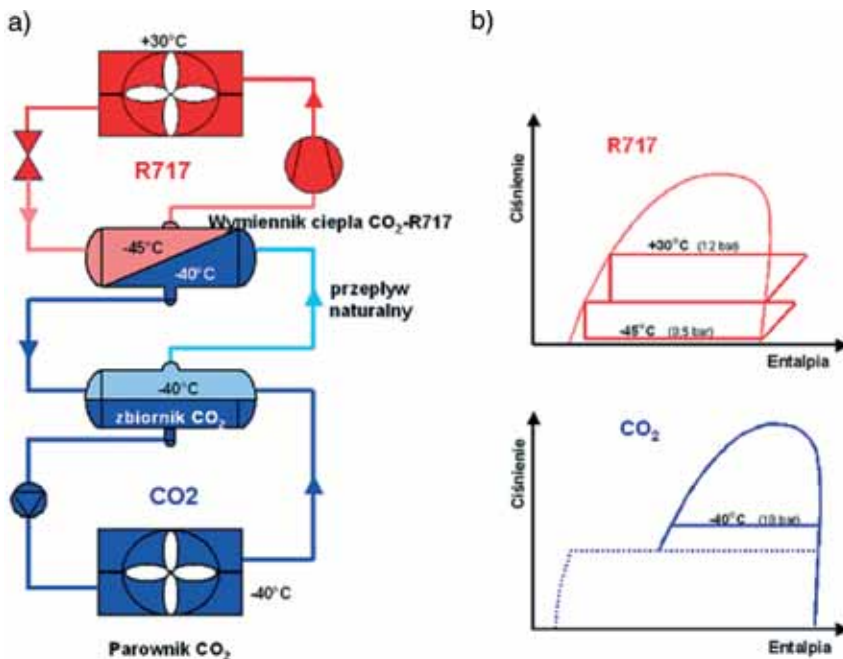
- + mała zawartość czynnika chłodniczego;
- + mniejsze ryzyko przecieków;
- + ewentualne przecieki ograniczone do maszynowni (są łatwiejsze do wykrycia),
- + łatwa i prosta obsługa;
- + możliwość zastosowania czynników naturalnych np.: NH₃, izobutanu, propanu;
- + możliwość zastosowania solanek i chłodziw zmieniających fazę (mieszanka lodowa, CO₂);
- + wysoka niezawodność ruchu.

Wady pośredniego systemu chłodzenia:

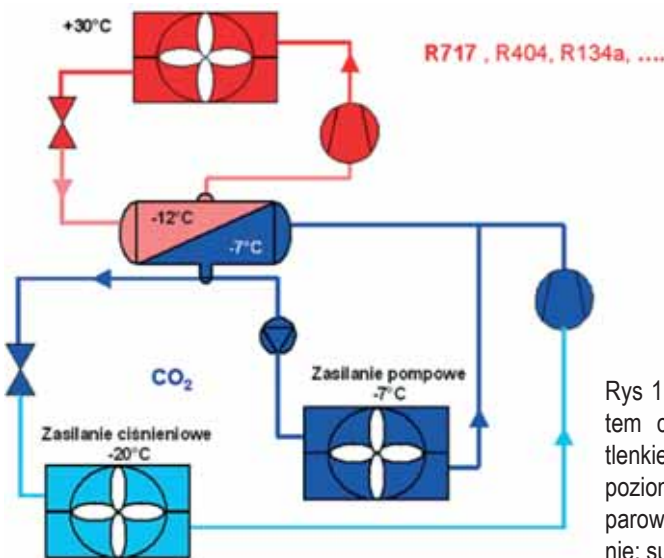
- zwykle niższa efektywność energetyczna niż w systemach bezpośrednich;
- dodatkowa energia potrzebna do pracy pomp przetłaczających czynnik wtórny;
- większa sieć przewodów;
- wyższy koszt instalacji spowodowany dodatkowymi elementami;
- konieczność stosowania dodatkowego urządzenia chłodniczego do utrzymania niskiej temperatury w oddzielaczu podczas postoju układu.

1.1.3 Układ chłodniczy z kilkoma poziomami temperatur parowania

Innym przykładem wykorzystania dwutlenku węgla jest układ kaskadowy, często wykorzystywany w instalacjach chłodniczych supermarketów, idealnie nadający się do instalacji obiektów przemysłowych o różnych poziomach temperatur parowania, co



Rys 1.7 Pośredni system chłodzenia z dwutlenkiem węgla jako nośnikiem ciepła [18]: a) schemat ideowy, b) przemiany termodynamiczne na wykresie p – h



Rys 1.8 Kaskadowy system chłodzenia z dwutlenkiem węgla i dwoma poziomami temperatur parowania (zastosowanie: supermarkety) [18]

pokazuje rysunek 1.8.

Dwutlenek węgla został tu zastosowany jako czynnik chłodniczy bezpośredni dla komory chłodniczej ($t_0 = -20^\circ\text{C}$), jak również dla komory zerowej ($t_0 = -7^\circ\text{C}$). Odbiory zerowe, zasilane są ze zbiornika cieczy CO_2 przez pompy, natomiast odbiory minusowe zasilane są ciśnieniowo poprzez zawory rozprężne. Pary czynnika zasysane są przez sprężarkę CO_2 z odbiorów minusowych i tłoczone do wymiennika kaskadowego – skraplacza. Pary mokre z komór zerowych wracają do zbiornika cieczy, skąd osuszona para przepływa do skraplacza CO_2 . Skraplacz

chłodzony jest poprzez obieg wysokiego ciśnienia mogący wykorzystywać czynniki naturalne (amoniak, propan, ...), jak również czynniki syntetyczne (R 404A, R 134a, ...). Zaletą zastosowania w takim systemie dwutlenku węgla jest, oprócz korzyści energetycznych, także ograniczenie o kilkadziesiąt procent napełnienia instalacji dość drogim drugim czynnikiem, np. „freonem”.

1.2 Wnioski końcowe

Podjęwając się oceny możliwości zastosowania dwutlenku węgla jako chłodziwa pośredniczącego należy za-

uważyć, iż cechuje się on korzystniejszymi właściwościami użytkowymi w porównaniu z tradycyjnymi solankami. Przewyższa je pod wieloma względami, a między innymi:

- wysokim ciepłem właściwym;
- niską lepkością dynamiczną (10 razy mniejszą niż lepkość wody);
- nieszkodliwością dla zdrowia człowieka, produktów spożywczych i środowiska;
- nie wywołuje korozji metali;
- małą objętością właściwą;
- wysokim współczynnikiem wydajności chłodniczej;
- łatwą dostępnością i niską ceną.

Natomiast jako czynnik chłodniczy do układów bezpośrednich, **dwutlenek węgla** posiada następujące **zalety**:

- względnie mały stosunek sprężania w porównaniu z typowymi czynnikami;
- całkowitą obojętność wobec materiałów konstrukcyjnych;
- dobre warunki pracy z olejami smarnymi;
- łatwą dostępność na rynku, niską cenę.

Do podstawowych trudności można zaliczyć wysokie ciśnienia robocze (50 bar przy $+15^\circ\text{C}$). Wymaga to stosowania bardziej zaawansowanych połączeń i konstrukcji. Podobny problem dotyczy wymienników, które muszą być dostosowane do pracy przy wyższych ciśnieniach.

Wśród ekspertów zachodnich panuje opinia, że przy dobrze dobranym chłodziwie i starannie zaprojektowanym układzie, **pośrednie urządzenia chłodnicze oparte na CO_2 , energetycznie i cenowo nie będą ustępować układom freonowym bezpośredniego parowania, a nawet je przewyższą.**

Układ dwuczynnikowy NH_3/CO_2 jest układem konkurencyjnym w porównaniu do układu $\text{NH}_3/\text{CaCl}_2$. Podstawowymi zaletami takiego rozwiązania są:

- nieszkodliwość dla środowiska obu czynników,
- małe średnice rur i zaworów,
- niewielkie gabaryty wymienników,
- a także brak korozji w całej instalacji.

cdn ...