

DOROTA SKRZYNIOWSKA, RENATA SIKORSKA-BĄCZEK*

CZYNNIKI ZIĘBNICZE NATURALNE JAKO PROEKOLOGICZNE W INSTALACJACH KLIMATYZACYJNYCH INŻYNIERII ŚRODOWISKA

NATURAL REFRIGERANTS IN AIR CONDITIONING SYSTEMS

Streszczenie

Instalacje do realizacji funkcji grzewczych i ziębiących, a w szczególności pompy ciepła o działaniu grzewczym i ziębiarki do obniżania temperatury powietrza oraz do jego odwilżania stwarzają zagrożenie dla osób, mienia i środowiska. Awaryjne tych sieci stanowią dodatkowe, dotychczas niedoceniane zagrożenie dla całej gospodarki. W instalacjach ziębniczych wykorzystywane są jako ziębniki substancje zubożające warstwę ozonową, zwane substancjami kontrolowanymi.

Zjawiska destruktywne (efekt cieplarniany i dziura ozonowa) wywoływane używaniem ziębników spowodowały wycofywanie tych substancji z urządzeń na mocy Protokołu Montrealskiego (1987). W ich miejsce poszukuje się nowych, ale też sięga do już kiedyś stosowanych, a nieszkodliwych dla środowiska czynników, takich jak: amoniak, woda, powietrze, węglowodory, które zostały omówione w niniejszym artykule.

Słowa kluczowe: chłodnictwo, naturalne czynniki ziębnicze, amoniak, dwutlenek węgla, woda, powietrze, węglowodory

Abstract

Due to environmental concerns, a new generation of refrigerants has been introduced. The new fluids perform well, but because of their remaining global warming potential they are still under scrutiny internationally and may be eliminated in the future. Research is underway to develop so-called "natural fluid" into the final solution to the quest for the ultimate refrigerant. The primary candidates are carbon dioxide, ammonia, water, air and hydrocarbons, discussed in this article.

Keywords: refrigeration, natural refrigerant, ammonia, carbon dioxide, water, air, hydrocarbons

* Dr inż. Dorota Skrzyniowska, dr inż. Renata Sikorska-Bączek, Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

Wybrane oznaczenia i jednostki:

q_o	– właściwe ciepło ziębienia (substancjonalne) [kJ/kg]
q_v	– właściwe ciepło ziębienia (objętościowe) [kJ/m ³]
q_k	– właściwe ciepło chłodzenia i skraplania [kJ/kg]
COP; CEER	– efektywność energetyczna, odpowiednio: dla pompy ciepła, dla ziębiarki [–]
P_o	– ciśnienie parowania [bar] [MPa]
t_o	– temperatura parowania [°C]
P_k	– ciśnienie skraplania [bar] [MPa]
t_k	– temperatura skraplania [°C]
t_{kr}	– temperatura krytyczna [°C]
P_{kr}	– ciśnienie krytyczne [bar]

1. Czynniki ziębnicze – właściwości fizyczne, ekologia i bezpieczeństwo w zastosowaniach

Instalację ziębniczą do transportu ciepła w procesach oziębiania lub ogrzewania w klimatyzacji tworzy układ elementów technicznych, takich jak maszyny, rurociągi i osprzęt, wypełniony obiegowym czynnikiem termodynamicznym, zwanym czynnikiem ziębniczym lub krótko ziębnikiem (ziębnik – refrigerant), podlegającym przemianom termodynamicznym w tym układzie. Według normy [8] czynnik ziębniczy to płyn służący do przekazywania ciepła, które przejmuje od ciała w niskiej temperaturze i pod niskim ciśnieniem oraz przekazuje do ciała o wyższej temperaturze i pod wyższym ciśnieniem, przy zachodzącej zazwyczaj zmianie stanu skupienia. Pierwszym płynem zastosowanym w instalacjach ziębniczych był amoniak. Jest on zaliczany do substancji zwanych naturalnymi (F. Carre 1860) [15]. W kolejnych latach powstawały różnorodne urządzenia ziębnicze, w których stosowano substancje naturalne, takie jak: eter etylu, chlorometan, dwutlenek siarki, propan, eter metylu, izobutan i dwutlenek węgla.

Substancji tych nie można było uznać za w pełni zadowolające ze względu na toksyczność, palność lub wybuchowość. W związku z tym zaczęto poszukiwać innych płynów, które byłyby pozbawione powyższych wad, a miałyby lepsze właściwości termodynamiczne i fizyczne od dotychczas stosowanych. Chodziło ponadto o znalezienie takiej substancji, która byłaby również całkowicie stabilna chemicznie w pełnym zakresie temperatur pracy, nie tworzyłaby mieszaniny wybuchowej z powietrzem, charakteryzowałaby się małą lepkością (wtedy przepływ płynu nie powoduje dużych oporów, a zatem i znacznych spadków ciśnienia w układzie). Substancja ta powinna być także substancją nietrującą (aby w razie wycieku nie powstawało niebezpieczeństwo zatrucia obsługi). Powinna mieć względnie duży współczynnik przejmowania ciepła (w procesach skraplania i odparowania), co zapewniałoby małe powierzchnie wymienników ciepła, a nie powinna wchodzić w reakcje z olejem smarnym. Inne pożądane atrybuty to niska (także ujemna) temperatura wrzenia odpowiednia do zastosowania, względnie niska temperatura punktu krzepnięcia i wysoka temperatura punktu krytycznego. Ponadto powinna być to substancja tania i łatwo dostępna.

Pierwszym, który zajął się poszukiwaniem takiego ziębnika był inż. T. Midgley, który wziął pod uwagę związki chloru, bromu, jodu i fluoru z węglem. Wśród nich znalazły się te, które stosowane były jeszcze do niedawna, a spotyka się i dzisiaj i potocznie nazywa

freonami (R-11, R-12, R-13 i R-22). Ale i te czynniki, choć lepsze termodynamicznie, okazały się niezadowolające, szczególnie wtedy, gdy S. Roland i M. Molina odkryli szkodliwość tych związków i ich destrukcyjny wpływ na środowisko (1974). Okazało się, że związek zawierający chlor, brom, jod i fluor (chlorofluorowęglowodory CFC) wytwarzane przez człowieka (antropogenicznie) emitowane do atmosfery powodują degradację środowiska naturalnego. Brom i chlor (w CFC) niszczą ozon stratosferyczny, powodując rozpad cząstek ozonu znajdujących się w górnej części atmosfery. Chlor i brom wchodzi w reakcje katalityczną, wskutek której niszczą cząstki ozonu. To z kolei redukuje naturalną ochronę Ziemi przed nadmiernym promieniowaniem ultrafioletowym szkodliwym dla organizmów. Ponadto związki te, akumulując się w atmosferze, naruszają bilans energetyczny planety. Tworzą one nad jej powierzchnią powłokę w rodzaju kołdry zatrzymującej odpływ ciepła w kosmos znad powierzchni atmosfery, co powoduje wzrost temperatury na powierzchni Ziemi.

Aby zapobiec tym niekorzystnym zjawiskom, państwa świata poczyniły pewne kroki, w tym również prawne. Według przepisów unijnych (Konwencja Wiedeńska, Protokół Montrealski wraz z poprawkami) konieczne jest wycofywanie z użycia czynników szkodliwych dla środowiska aż do całkowitego ich wyeliminowania z instalacji.

Do oceny oddziaływania związków na środowisko wprowadzono wskaźniki oceny oddziaływania uwalnianego do atmosfery czynnika żiębniczego: ODP (*Ozon Depletion Potential*), czyli potencjał niszczenia warstwy ozonowej charakteryzujący wpływ danej substancji na intensywność rozkładu ozonu (odniesiony do freonu R-11, dla którego ODP = 1) oraz GWP (*Global Warming Potential*), czyli globalny potencjał ocieplenia odniesiony do CO₂, dla którego GWP_{CO₂} = 1. Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego w przyjętym horyzoncie czasowym oddziaływania wynosi zwykle 100 lat. W tabelicy 1 zestawiono wartości ODP i GWP dla wybranych najczęściej spotykanych czynników żiębnicznych.

Ponieważ powszechnie dotychczas stosowane żiębniki mają GWP > 1500, więc z punktu widzenia ochrony środowiska, które stanowi nadrzędną wartość w dobie ogromnego wzrostu zanieczyszczenia, preferowane są substancje lub związki nieszkodliwe, obecne w biosferze, czyli tzw. czynniki żiębnicze pochodzenia naturalnego. Są one nieszkodliwe dla środowiska naturalnego, gdyż mają ODP = 0 i GWP bliskie 0. Jednak ze względu na swoje właściwości wykazują ograniczony zakres stosowalności. Do czynników naturalnych występujących w przyrodzie zalicza się:

- amoniak,
- dwutlenek węgla,
- wodę,
- powietrze,
- węglowodory (etan, etylen, propan, propylen, butan, izobutan) (tabl. 1).

Naturalne czynniki żiębnicze mogą być zamiennikami dotychczas stosowanych czynników wycofywanych ze względów ekologicznych. Zamienność ta jednak w wielu przypadkach wywołuje potrzebę rekonstrukcji istniejących instalacji lub stosowania innych materiałów i wyposażenia, a także nowych zasad projektowania instalacji, m.in. także z powodu bezpieczeństwa (np. wybuchowość mieszanki powietrza i węglowodorów).

Wybór zamiennika spośród akceptowalnych żiębników zależy od wymagań zastosowania i stanowi kompromis pomiędzy poszczególnymi własnościami. Dla żiębnienia w zakresie temperatur od -50°C do +10°C, obejmujących tzw. typowe klasyczne zastosowania, odpowiadają np. trzy czynniki żiębnicze: amoniak, propan, CO₂.

ODP i GWP dla wybranych powszechnie stosowanych czynników ziębicznych [17]

Czynniki ziębiczne		ODP	GWP
Chlorofluorowęglowodory	CFC-11	1	3800
	CFC-12	1	8100
Wodorochlorofluorowęglowodory (tzw. freony)	HCFC-22	0,055	1500
	HCFC-141b	0,11	631
	HCFC-142b	0,065	2000
Wodorofluorowęglowodory (tzw. freony)	HFC-32	0	650
	HFC-125	0	2500
	HFC-134a	0	1300
	R-407C	0	1520
	R-410A	0	1725
Uznawane za czynniki naturalne	dwutlenek węgla (R-744)	0	1
	amoniak (R-717)	0	0
	izobutan (R-600a)	0	3
	propan (R-290)	0	3
	cyklopropan (RC-270)	0	3

Zamienniki ziębików – przykłady






Zamiennik	Amoniak R-717	Dwutlenek węgla	Węglowodory (Propan R-290 Izobutan)
dla	R-22, R-502	R-134a (np. w klimatyzacji samochodowej, ale z nową instalacją jak dla CO ₂)	R-12, R-502, R-22, R-134a

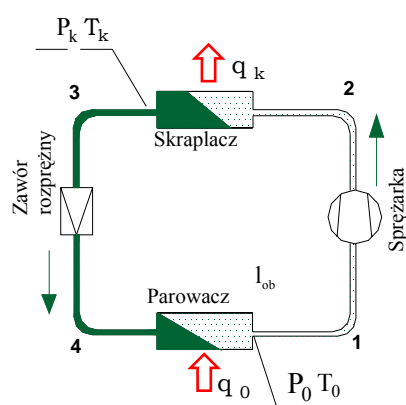
Do porównania i termodynamicznej oceny czynników ziębicznych używa się wielu wskaźników. Należą do nich m.in. (ryc. 1 i 2) właściwe ciepło ziębienia q_0 , a dla pompy ciepła p_k – efektywność energetyczna (CEER dla ziębiarki lub COP dla pompy ciepła), stosunek sprężania p_k/p_0 , temperatura końca sprężania T_2 , nieizotermiczność przemiany fazowej (np. dla mieszanin przy $p_0 = \text{const } T_{1a} - T_4 \neq 0$).

W typowych rozwiązaniach ziębiarek obieg ziębiczny jednostopniowy jest realizowany w taki sposób, że skraplanie i odparowanie ziębnika odbywa się w procesach przebiegających w obszarze pary mokrej przy odprowadzaniu ciepła ze skraplacza do otoczenia naturalnego. Jednak w przypadku CO₂ przebieg procesów jest inny, co przedstawiono na ryc. 9.

Typowy układ ziębiczny składa się z 4 elementów: sprężarki, skraplacza, parowacza i zaworu rozprężnego. Zawór rozprężny i sprężarka dzielą całe urządzenie na dwie części: stronę niskiego i stronę wysokiego ciśnienia (ryc. 1). W czasie obiegu czynnik ziębiczny podlega przemianom fazowym. Powietrze przekazujące ciepło czynnikowi ziębiczemu jest oziębiane w wymienniku ciepła (parowaczu) urządzenia klimatyzacyjnego (przemiana 4-1, ryc. 2).

Przykłady typowych zastosowań

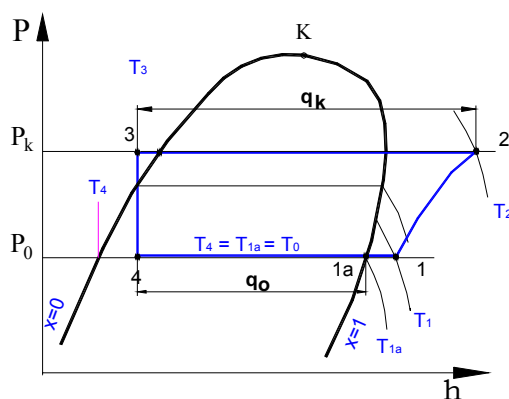
Czynnik naturalny	Zastosowanie	
Amoniak		Duże instalacje przemysłowe (systemy pośrednie, np. supermarkety), pompy ciepła (systemy pośrednie i bezpośrednie)
Węglowodory (propan i izobutan)		Domowy sprzęt chłodniczy, pompy ciepła
Dwutlenek węgla		Supermarkety – instalacje kaskadowe, klimatyzacja samochodowa, okrętowe instalacje ziębnicze, przemysł spożywczy (mleczarski)
Woda		Klimatyzacja, przemysłowe absorpcyjne i turbosprężarkowe agregaty ziębnicze
Powietrze		Instalacje stosowane w lotnictwie



Ryc. 1. Schemat ideowy zespołu realizującego obieg ziębniczy (ziębiarki) [13]

Fig. 1. Schematic diagram of refrigerating cycle

W drugim wymienniku ciepła (skraplaczu) następuje przekazanie przez czynnik ziębniczy do czynnika chłodzącego (np. otoczenia) wcześniej przejętego ciepła w parowaczu i ciepła pracy sprężania przy równoczesnym jego skropleniu (przemiana 2–3, ryc. 2). Wymiana ciepła pomiędzy dwoma czynnikami jest możliwa tylko wówczas, gdy między nimi występuje różnica temperatur. Czynnik wykorzystywany do ziębnienia musi więc mieć niższą temperaturę niż np. powietrze oziębiane. Dzięki temu czynnik zmienia stan w parowaczu z ciekłego na gazowy (ryc. 2) i odwrotnie, w przypadku gdy czynnik przechodzi w stan ciekły (jak to ma miejsce w skraplaczu), wówczas jego temperatura musi być wyższa od temperatury np. otoczenia przejmującego ciepło.



Ryc. 2. Obieg ziębniczy na wykresie: ciśnienie – entalpia właściwa (p-h), 1–2 proces w sprężarce, 2–3 proces w skraplaczu, 3–4 proces w zaworze dławiącym, 4–1 proces w parowaczu

Fig. 2. Refrigerating cycle on p-h chart

2. Amoniak R-717 (NH₃) jako czynnik ziębniczy (ziębnik – refrigerant)

Amoniak został po raz pierwszy zastosowany w chłodnictwie przez Francuza Care, który zbudował w 1859 r. absorpcyjne urządzenie ziębnicze. Kilkanaście lat później niemiecki inżynier K. Linde zbudował pierwsze amoniakalne urządzenie sprężarkowe (1867). Od lat 30. XX w. amoniak stał się podstawowym czynnikiem ziębniczym w instalacjach przemysłowych średniej i dużej mocy stosowanych przede wszystkim w przemyśle spożywczym, chemicznym, przetwórczym.

Amoniak ma bardzo dobre własności termodynamiczne (właściwe ciepło parowania = 1154 kJ/kg, bardzo duży współczynnik przewodzenia ciepła, dla pary → 0,026 W/mK, dla cieczy → 0,481 W/mK) i niedużą masę cząsteczkową. Taka masa cząsteczkowa oraz duże właściwe ciepło parowania umożliwiają przy tej samej wydajności w porównaniu z R-22 zmniejszenie strumieni masowych czynnika krążącego w instalacji ziębniczej, a w ślad za tym – zmniejszenie spadków ciśnienia wskutek oporów przepływu. Większe wartości współczynników wnikania ciepła w parowaczach i skraplaczach prowadzą przy tej samej wydajności do ich mniejszych powierzchni, a dzięki temu do niższej ceny. Amoniak jest stosowany w dużych instalacjach ziębniczych (100–5000 kW) ulokowanych np. w chłodniach, masarniach, mleczarniach, browarach i centrach sportowych.

W niektórych dziedzinach, np. w instalacjach okrętowych, mleczarniach i klimatyzacji, jedynym konkurentem amoniaku był CO₂. Z chwilą pojawienia się syntetycznych czynników chłodniczych zwanych freonami amoniak został wycofywany z powodu stwierdzonych zagrożeń (toksyczność, palność, wybuchowość). Dopiero kiedy odkryto również szkodliwość freonów i ich destrukcyjny wpływ na warstwę ozonową Ziemi oraz kiedy zaczęto zwracać uwagę i porównywać wpływ na tworzenie się globalnego efektu cieplarnianego, amoniak ponownie zaczął być stosowany.

Wynikało to z faktu, że wraz z rozwojem nowoczesnych środków technicznych i organizacyjnych zagrożenia z powodu stosowania amoniaku stawały się coraz mniej znaczące, a jego zalety termodynamiczne uznano za dominujące.

Ponadto opracowano nowe, dostosowane do współczesnej techniki oraz potrzeb przepisy bezpieczeństwa [8–11], których przestrzeganie eliminuje zagrożenie. W budowie urządzeń pojawiły się również nowe rozwiązania. Wprowadzono sprężarki śrubowe, nowoczesne pompy i wentylatory oraz aparaturę o małym napełnieniu czynnikiem. Zastosowano mikroprocesorową i komputerową automatykę sterującą, regulacyjną i zabezpieczającą, a także udoskonalono znane pośrednie systemy ziębienia i grzania działające dzięki czynnikom pośredniczącym charakteryzującym się lepszymi własnościami. Dotychczas żaden czynnik chłodniczy nie został tak dogłębnie sprawdzony i poznany jak amoniak, dlatego też inżynierowie i technicy nie mają do niego uprzedzeń. Niestety, obawy przed amoniakiem ciągle jeszcze przeważają wśród użytkowników.

Obecnie amoniak jako czynnik chłodniczy jest stosowany w układach jedno- i dwustopniowych średnich i dużych sprężarkowych urządzeń chłodniczych, głównie przemysłowych. Czynnik ten nadaje się przede wszystkim do pracy w instalacjach ze sprężarkami śrubowymi i tłokowymi. Zakres stosowanych w instalacjach z tym czynnikiem temperatur skraplania dochodzi do 40°C, natomiast temperatur parowania do –60°C. Interesującym obszarem jest chłodnictwo domowe, gdzie w chłodziarkach absorpcyjnych pozwala osiągać temperatury parowania do –45°C. Obecnie rozważa się możliwość wykorzystania amoniaku do celów klimatyzacji pomieszczeń oraz w instalacjach chłodniczych o wydajności poniżej 5 kW, stosowanych w handlu i gospodarstwach domowych.

2.1. Wybrane właściwości fizyczne amoniaku

Amoniak jest nieorganicznym związkiem chemicznym, który w normalnych warunkach jest gazem bezbarwnym, o drażniącym zapachu, palnym, silnie toksycznym, wywołującym intensywne łzawienie, charakteryzującym się ostrym alkalicznym smakiem. Z powietrzem wilgotnym tworzy mieszanę, która może być wybuchowa.

Ostry i charakterystyczny zapach amoniaku ostrzega już przy małych i niegroźnych stężeniach na długo przed osiągnięciem stężenia niebezpiecznego. Umożliwia to bezpieczne i stosunkowo łatwe wykrycie miejsca jego przecieków w instalacji i w rezultacie skuteczne zapobieganie niebezpieczeństwu większych wycieków. Wyciek amoniaku przez nieszczelności można także łatwo wykryć nawet zwilżonym czerwonym papierkiem wskaźnikowym, który w kontakcie z amoniakiem zmienia barwę na niebieską.

Amoniak jest agresywny w stosunku do wielu metali. Działa na miedź i jej stopy, cynk i ołów (zatem nie można stosować sprężarek hermetycznych z uzwojeniem miedzianym napędowych silników elektrycznych). Nie niszczy żelaza i jego stopów (stal jest zatem podstawowym materiałem konstrukcyjnym dla urządzeń amoniakalnych). Amoniak z rżnię

tworzy mieszkankę wybuchową, dlatego nie można w tych instalacjach stosować manometrów rtęciowych.

Para amoniaku jest lżejsza od powietrza, dlatego maszynownie powinny mieć wentylację wywiewną umieszczoną u góry (np. przy suficie).

Amoniak rozpuszcza się w stosowanych olejach mineralnych w śladowych ilościach (dzięki temu nie występuje np. zjawisko pienienia się substancji smarnej podczas rozruchu sprężarek, jak to się zdarza to z HCFC i HFC). Nie jest też agresywny w stosunku do większości tworzyw sztucznych (mniejsza gęstość amoniaku i względnie mała rozpuszczalność tego oleju w porównaniu z olejem mineralnym ze sprężarek umożliwia jego samooddzielenie się i łatwy spływ do osadników olejowych instalacji). Nie wchodzi w reakcje z olejami smarnymi syntetycznymi. Obecność wody nie ma tak istotnego wpływu jak w instalacjach freonowych.

Wysoka temperatura końcowa sprężania jest poważną wadą amoniaku i z tego powodu w sprężarkach tłokowych wymagane jest chłodzenie głowic.

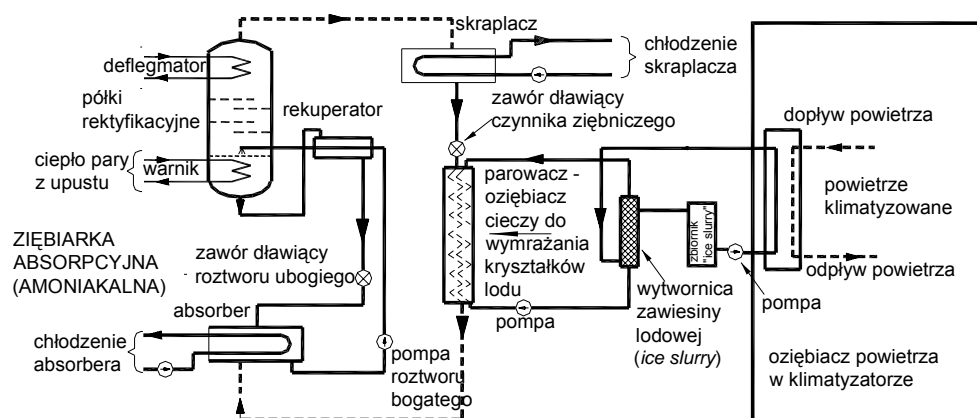
Istotną zaletą amoniaku jest jego niska cena w porównaniu z czynnikami ziębniczymi syntetycznymi.

2.2. Amoniak jako czynnik ziębniczy w ziębiarce absorpcyjnej napędzanej ciepłem odpadowym z procesów produkcyjnych

Dla celów klimatyzacji proponuje się także nowatorskie i coraz lepiej przebadane i sprawdzone systemy z akumulacją zimna w lodzie, które przyczyniają się w znaczącym stopniu do poszanowania energii i środowiska. Mogą one współdziałać albo ze wspomnianymi typowymi ziębiarkami sprężarkowymi, albo z ziębiarkami absorpcyjnymi, w których ziębnikiem jest amoniak, absorbentem woda, a energią do realizacji obiegu absorpcyjnego ziębienia jest ciepło odpadowe o temperaturze powyżej 120°C. Zaletą tych ziębiarek w porównaniu z ziębiarkami tzw. bromolitowymi, w których ziębnikiem jest woda, a absorbentem bromek litu, jest możliwość uzyskiwania ujemnych temperatur odparowania, a przez to możliwość stosowania akumulacji zimna w lodzie. Jednym ze sposobów akumulacji jest wytwarzanie „zawiesiny lodowej” w cieczy (tzw. *ice slurry*). Zawiesinę lodową tworzy mieszanina małych cząsteczek lodu o średnicy około 0,01 do 0,1 mm z wodą i cieczą obniżającą temperaturę zamarzania. Systemy ziębienia z zawiesiną lodową znajdują coraz większe zastosowanie praktyczne, również w klimatyzacji, ponieważ zawiesina lodowa magazynująca zimno nadaje się do transportu pompami i rurociągami do miejsc odbioru zimna (np. stosowanego w okresie szczytowego obciążenia cieplnego obiektu (ryc. 3)). Umożliwia to znaczne zmniejszenie wielkości składników wyposażenia instalacji ziębniczej:

1. Temperatura czynnika pośredniczącego może wynosić 0°C, a przy odpowiednich mieszaninach nawet niżej, czego nie można uzyskać w powszechnie stosowanej ziębiarce bromolitowej.
2. Strumień masowy zawiesiny lodowej może być wielokrotnie mniejszy od strumienia samej wody (przy takiej samej wydajności ziębienia) z powodu „ciepła utajonego” topnienia lodu większego od właściwej pojemności cieplnej c_p wody, wykorzystywanej w ziębiarce bromolitowej, przy zmianie jej temperatury podczas przejmowania ciepła.
3. Pole powierzchni oziębiacza powietrza może być mniejsze dzięki stałej temperaturze zawiesiny lodowej, a więc większej średniej logarytmicznej różnicy temperatur wymiany ciepła.

Z przeprowadzonych badań wynika, że przy prędkościach przepływu zawiesiny lodowej od 0,5 do 1,5 m/s współczynnik wnikańia ciepła zmienia się w granicach od 1500 do 5000 W/m²K (przy średnicach rurociągu od 12 do 28 mm i przy masowej koncentracji lodu 5–30%). Natomiast spadek ciśnienia na opory przepływu w tych warunkach wynosił 250–3500 Pa/m. Jak widać, są to wartości porównywalne z wartościami występującymi w typowych oziębiaczach powietrza stosowanych w klimatyzacji [12].



Ryc. 3. Schemat ideowy ziębiarki absorpcyjnej amoniakalnej do uzyskiwania zawiesiny lodowej [12].
Roztwór wodny amoniaku z absorbera: „roztwór bogaty” (w amoniak – ziębnik). Roztwór wodny amoniaku z warnika: „roztwór ubogi” (w amoniak – ziębnik)

Fig. 3. Schematic diagram of absorption refrigerator with ammonia for ice slurry

Ponadto zawiesinę lodową stosuje się również w supermarketach do zasilania lad wystawowych, chłodziarek, zamrażarek oraz komór chłodniczych i zamrażalniczych do oziębiania cieczy wrażliwych na wysoką temperaturę typu mleko, oleje, soki owocowe. Zawiesiną lodową oziębia się także ryby, owoce, warzywa. Stosowany jest również do klimatyzacji kopalń, tunelowych wychładzalni mięsa, drobiu i innych produktów.

3. Węglowodory

Węglowodory (HC), takie jak propan (R-290), izobutan (R-600a), cyklopropan (RC-270) i ich mieszaniny są stosowane jako czynniki ziębnicze w specjalnych systemach, np. w instalacjach petrochemicznych. Obieg ziębniczy realizowany jest w zespole instalacyjnym złożonym z elementów instalacji wg schematu ideowego (ryc. 1). Najczęściej stosowanymi węglowodorami są izobutan i propan.

3.1. Izobutan (R-600a)

Izobutan (R-600a) początkowo stosowany był najczęściej w urządzeniach w zakładach produkcyjnych, w których był używany jako paliwo. Z powodu swej palności został wyparty przez freony. Jednak obecnie z powodu wycofywania freonów na nowo jest wprowadzany

dzany – najczęściej w chłodziarkach domowych i klimatyzatorach jako czysty czynnik lub w mieszaninach z propanem. Jest to gaz będący naturalnym produktem rozkładu biologicznego, głównie roślin. Izobutan jest łatwopalny. Z powietrzem tworzy mieszaniny wybuchowe. Jednak z powodu niewielkich ilości, np. w chłodziarkach domowych i innych urządzeniach chłodniczych typu AGD (np. oziębianie wody pitnej z kurków ogólnodostępnych) (10 do 50 g), nie stanowi zagrożenia nawet w bardzo małych pomieszczeniach. Para izobutanu jest cięższa od powietrza – gromadzi się przy powierzchni podłóg i w dolnych partiach pomieszczeń. Izobutan działa słabo drażniąco na skórę, oczy i drogi oddechowe. Z toksykologicznego punktu widzenia nie wykazuje żadnego działania chemicznego. Duszące działanie izobutanu jest proporcjonalne do stężenia w atmosferze, a tym samym do stopnia zmniejszenia się w niej zawartości tlenu. R-600a jest stabilny chemicznie. Nie powoduje korozji metali, natomiast niszczy gumę. Tworzy roztwory z olejami mineralnymi. Izobutan ma gorsze parametry termodynamiczne od R-12 (dwukrotnie mniejsze właściwe ciepło ziębienia, małą lepkość, niską temperaturę końca sprężania).

3.2. Propan (R-290)

Propan jest jednym z najstarszych czynników naturalnych stosowanych w chłodnictwie. Jako czynnik ziębiczny był raczej ostrożnie używany z racji swej łatwopalności (grupa A3 wg ASHRAE). Jednak z powodu ODP = 0, GWP = 0 na nowo jest wprowadzany w chłodnictwie, zwłaszcza w dużych instalacjach ziębicznych w przemyśle, np. chemicznym, petrochemicznym, jak i w chłodziarkach domowych, handlowych, a także agregatach hermetycznych. Jest gazem bezbarwnym, bezwonny. Ma dobre własności termodynamiczne, podobne do amoniaku. Jest to związek nieagresywny zarówno wobec metali, jak i tworzyw sztucznych. Propan ma duże właściwe ciepło ziębienia, co umożliwia redukcję napełnienia instalacji w porównaniu do R-22 o ok. 30%. Poważną wadą propanu jest jego palność. Wiele przepisów bezpieczeństwa zmusza do stosowania czujników instalacji wczesnego ostrzeżenia w wypadku wycieku (przy napełnieniu przekraczającym 300 g) oraz odpowiedniej wentylacji w pomieszczeniach, w których znajdują się wyposażenia instalacji ziębicznej z propanem.

Propan jako ziębnik znajduje coraz szersze zastosowanie w pompach ciepła, urządzeniach klimatyzacyjnych o małej wydajności oraz w chłodnictwie transportowym. Nie oddziałuje na materiały konstrukcyjne używane do budowy instalacji ziębicznych. Jedną z cennych zalet propanu są niewielkie wartości stosunku sprężania umożliwiające osiąganie stosunkowo niskich temperatur parowania (do -40°C) w jednym stopniu sprężania. Dzięki temu dla propanu uzyskuje się korzystne warunki smarowania i wysoką odporność na rozkład termochemiczny. Efektywność energetyczna obiegów z propanem jest porównywalna z efektywnością uzyskiwaną dla R-22. Stosowanie propanu jako czynnika ziębicznego wymaga szczególnych środków ostrożności, w tym bezwzględnego przestrzegania przepisów bezpieczeństwa. Szczegółowe przepisy dotyczące propanu zawarto w normie [9–11]. Węglowodory są czynnikami stosunkowo tanimi.

4. Dwutlenek węgla R-744 (CO_2)

Dwutlenek węgla CO_2 jest coraz częściej brany pod uwagę w zastosowaniach w chłodnictwie i klimatyzacji ze względu na wyjątkowe własności fizyczne, termodynamiczne

i bezpieczeństwa. Poszukuje się korzystnych rozwiązań w zastosowaniach do celów komercyjnych, domowych, militarnych, samochodowych i przenośnych.

Dwutlenek węgla jest naturalnym, bezbarwnym, bezwonny gazem produkowanym na różne sposoby: przez spalanie lub utlenianie materiałów zawierających pierwiastek węgiel, jak np. węgiel, olej lub związki organiczne. Ulatnia się on w efekcie fermentacji alkoholowej, a także jest wydychany przez prawie wszystkie organizmy żywe. Natomiast rośliny żyjące dzięki procesowi fotosyntezy wykorzystują CO_2 jako substrat w wielu reakcjach chemicznych prowadzących do wydzielania tlenu cząsteczkowego – O_2 oraz do produkcji glukozy. CO_2 jest używany w produkcji sody krystalicznej i węgla ołowiu. Rozpuszczony pod ciśnieniem (2–5) atm, CO_2 powoduje burzenie się gazowanych napojów. CO_2 nie pali się i nie podtrzymuje spalania. Dzięki swoim właściwościom jest używany do gaszenia pożarów. Stały CO_2 , zwany suchym lodem (zestalony), jest używany jako „źródło zimna” w transporcie mrożonych produktów spożywczych, a także w medycynie, chemii, metalurgii i w przemyśle chemicznym (produkcja kosmetyków, barwników, mas plastycznych) [14]. Jego efekt ziębienia jest prawie dwa razy większy niż lodu H_2O (ciepło sublimacji wynosi 573,1 kJ/kg, a temperatura sublimacji $-78,8^\circ\text{C}$). Istotną zaletą jest to, że podlega sublimacji i przez to wytwarza atmosferę gazów obojętnych, co zmniejsza rozwój bakterii ważny dla produktów i środków spożywczych (np. owoce). W organizmie ludzkim CO_2 zastępuje powietrze i wypiera tlen.

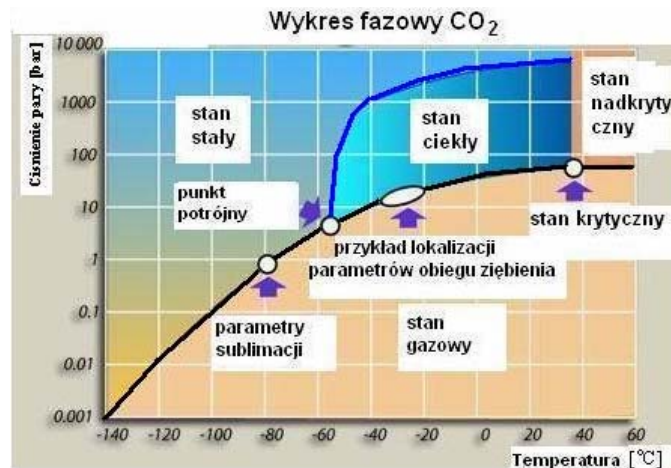
Obecność CO_2 we krwi stymuluje oddychanie. Z tego powodu CO_2 jest dodawany do tlenu lub powietrza do respiratorów i do gazów używanych w anestezjologii.

CO_2 jest jednym z najwcześniej stosowanych czynników ziębniczych. Po raz pierwszy został użyty przez Lowe w 1866 r. (140 lat temu) [15]. W 1881 r. zastosowany został przez Lindego. Przez ponad pół wieku aż do lat 30. CO_2 był w powszechnym użyciu. Z powodu zupełnej nieszkodliwości CO_2 był głównie używany na statkach, ale też w przemyśle spożywczym i urządzeniach klimatyzacyjnych. Potem nastąpiła era freonów i o CO_2 zapomniano na długie lata. Głównym powodem, z jednej strony, były freony uznane za doskonałe termodynamicznie, a z drugiej – fakt, że CO_2 był stosowany na statkach dalekomorskich pływających na morzach tropiku, gdzie temperatura otoczenia, do którego przekazywane jest ciepło ze skraplacza przekraczała temperaturę krytyczną CO_2 ($t_{kr} = 31,1^\circ\text{C}$). Powodowało to spadek wydajności ziębienia i wzrost poboru mocy napędowej sprężarek, czemu towarzyszyło ich przegrzewanie. Z tą wadą zaczęto sobie skutecznie radzić dopiero, kiedy to w 1994 r. Gustav Lorentzen z Institute of Refrigeration Engineering (Norwegia) opublikował na konferencji ziębniczej pracę, w której wprowadził do użytkowania **obieg transkrytyczny dla CO_2** i zaproponował zastosowanie go w pompach ciepła i klimatyzacji samochodowej. Według G. Lorentzena CO_2 jest prawie idealnym czynnikiem konkurencyjnym dla wszystkich innych branych pod uwagę. Temperatura krytyczna dla CO_2 wynosi $t_{kr} = 31,1^\circ\text{C}$, ciśnienie krytyczne $p_{kr} = 73,83$ bar, parametry sublimacji: temperatura $-78,8^\circ\text{C}$ i ciśnienie 1,0 bar, parametry punktu potrójnego: temperatura $-56,6^\circ\text{C}$ i ciśnienie 5,19 bar (ryc. 4).

4.1. Obieg ziębniczy CO_2

Realizacja tego obiegu odbywa się w zespole instalacyjnym zaprezentowanym na schematach (ryc. 5 i 6). Dla CO_2 (w odróżnieniu od większości czynników ziębniczych, które oddają ciepło do otoczenia przez izobaryczne skraplanie), dla którego temperatura

krytyczna jest niższa od temperatury otoczenia, oddawanie ciepła nie może odbywać się na drodze skraplania bez ochładzania sprężanego ziębnika. Proces ten odbywa się przy ciśnieniu nadkrytycznym i nie w skraplaczu, a w oziębiaczu gazu. Natomiast proces wrzenia zachodzi w obszarze podkrytycznym. Zatem obieg ziębniczy z CO₂ odbywa się pomiędzy ciśnieniami podkrytycznym i nadkrytycznym, czyli w tzw. obiegu transkrytycznym (ryc. 8) [16].



Ryc. 4. Wykres fazowy dla CO₂ wraz z obszarem najczęstszych parametrów działania ziębniczego

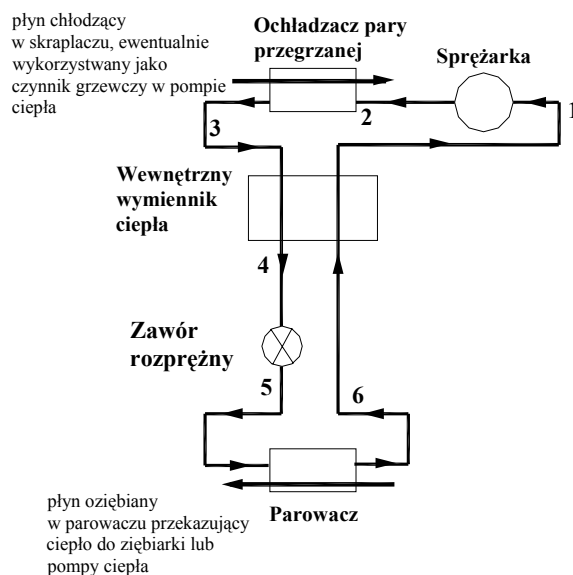
Fig. 4. Phase diagram of CO₂

Nad rozwiązaniami konstrukcyjnymi instalacji ziębniczych z CO₂ pracuje wiele ośrodków badawczych i firm, jak np. University of Illinois, USA, Volkswagen, Visteon (ryc. 5) [4].



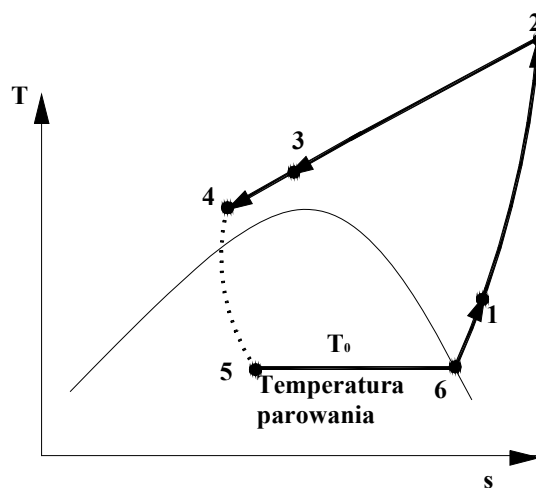
Ryc. 5. Schemat ideowy instalacji ziębniczej z CO₂ [4] (liczby dotyczą parametrów obiegu na ryc. 7)

Fig. 5. Unit layout of refrigerating system with CO₂



Ryc. 6. Schemat ideowy instalacji ziębniczej z CO₂ (liczby dotyczą parametrów obiegu na ryc. 7)

Fig. 6. Schematic diagram of refrigerating system with CO₂



Ryc. 7. Obieg ziębienia z czynnikiem CO₂ na wykresie T-s (1–2 proces w sprężarce, 2–3 proces w ochładzacz pary przegrzanej, 3–4 proces w doziębiaczu, 4–5 proces w zaworze rozprężnym, 5–6 proces w parowaczu, 6–1 przegrzanie pary w wymienniku ciepła)

Fig. 7. Refrigerating cycle with CO₂ on T-s chart

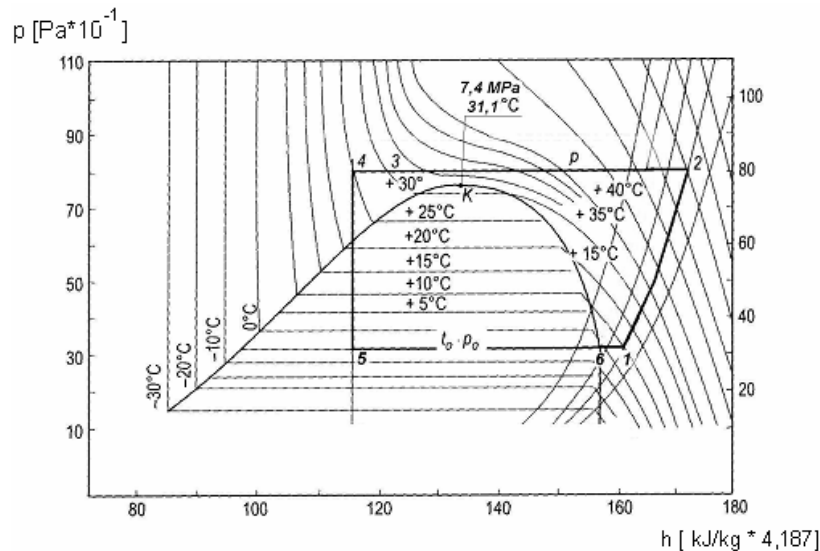
Ryc. 8. Obieg ziębiczny dla CO₂ (transkrytyczny) na wykresie p-h [4]

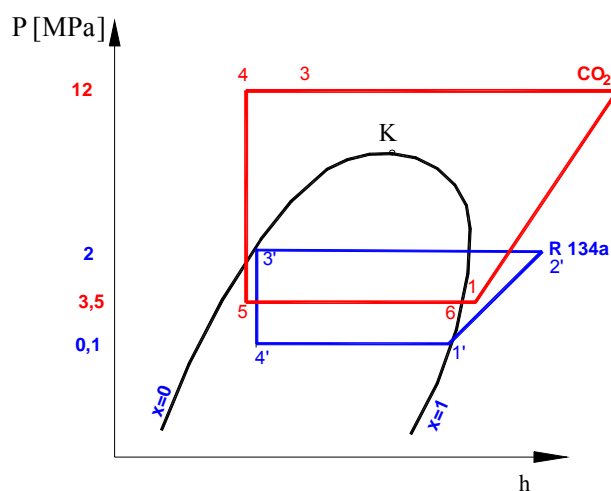
Fig. 8. P-h diagram for transcritical cycle

Sprężarka zasysa parę z parowacza przez oddzielacz cieczy oraz wewnętrzny regeneracyjny wymiennik ciepła. Po sprężeniu (stan 2, ryc. 6) włącza ją do ochładzacza pary przegrzanej. Ochłodzona para (stan 4) ulega zdławieniu w elemencie regulacyjnym (do stanu 5) i mieszanina pary i cieczy dopływa do parowacza, gdzie następuje izobaryczne wrzenie (do stanu 6). W wewnętrznym wymienniku ciepła następuje przegrzanie pary (stan 1) [14, 16]. Dużą zaletą obiegu ziębicznego z CO₂ jest możliwość kontrolowania ciśnienia, przy którym jest oddawane ciepło niezależnie od temperatury.

4.2. Porównanie obiegu dla R-134 i CO₂

Ciśnienie wynoszące powyżej 10 MPa wymaga zastosowania w miejsce tradycyjnego skraplacza specjalnego ochładzacza pary przegrzanej i innych elementów pozwalających na przemysłowe zastosowanie takiej instalacji.

- Pod względem ciśnień roboczych dwutlenek węgla jest najmniej korzystnym czynnikiem ziębicznym:
 - w skraplaczu ciśnienie może sięgać ok. 10 MPa przy wysokiej temperaturze wody lub powietrza chłodzącego wymiennik (w normalnych warunkach chłodzenia sięga 6–8 MPa),
 - w parowacu ciśnienie nie może być mniejsze niż 0,6 MPa, ponieważ przy ciśnieniu 0,518 MPa i temperaturze –56,6°C czynnik ten zamarza – punkt potrójny (ryc. 4).
- W przypadku wysokiej temperatury wody chłodzącej obieg jest częściowo realizowany w obszarze nadkrytycznym, co oznacza, że sprężarka wytłacza nie parę, lecz gaz. Wówczas w skraplaczu nie zachodzi proces skraplania pary czynnika, lecz ochładzanie gazu (ryc. 8).



Ryc. 9. Porównanie obiegu odwracalnego dla R-134a (1', 2', 3', 4') i obiegu transkrytycznego dla CO₂ (1, 2, 3, 4, 5) [6]

Fig. 9. Comparison systems with CO₂ and R-134a

3. Efektywność energetyczna COP obiegu transkrytycznego jest mniejsza niż w obiegu parowym. Im wyższe jest ciśnienie sprężania, tym mniejsza jest efektywność energetyczna. Im wyższa jest temperatura przed zaworem rozprężnym, czyli mniejsze dochłodyzenie czynnika, tym efektywność jest mniejsza.
4. Relatywnie wysokie ciśnienie pracy instalacji na CO₂ powoduje, że ze względów wytrzymałościowych średnice cylindrów sprężarek muszą być znacznie zmniejszone w porównaniu ze standardowymi sprężarkami ژیębniczymi, co pozwala na uzyskanie najbardziej zwartych konstrukcji urządzeń.

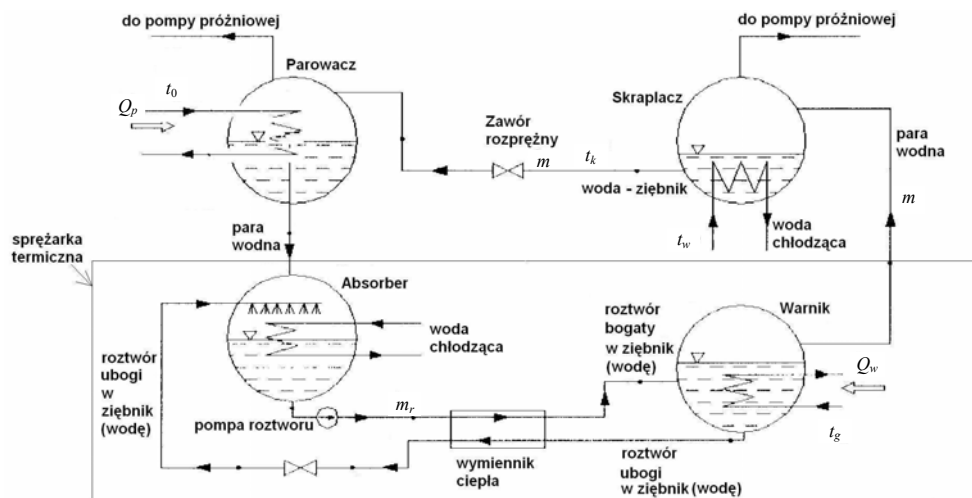
5. Woda R-718 (H₂O)

Woda była pierwszym czynnikiem ژیębniczym wykorzystywanym do sztucznego wytwarzania zimna. W 1755 r. profesor medycyny William Cullen zamroził wodę przez jej odparowanie pod zmniejszonym ciśnieniem w maszynie pneumatycznej. W kolejnych latach próby użycia wody jako czynnika ژیębniczego zostały zrealizowane dzięki zastosowaniu tzw. smoczków parowych (ejektorów), które przetłaczają duże strumienie zasysanego czynnika (pary wodnej), zajmując przy tym bardzo mało miejsca. W urządzeniach tych oziębienie wody następowało wskutek jej częściowego odparowania w próżni wytworzonej przez smoczek parowy (strumienicę).

Woda jest substancją tanią, ogólnodostępną, nietoksyczną i nieagresywną chemicznie. Wśród wad można wymienić brak możliwości osiągnięcia temperatur niższych od 0°C, bardzo dużą objętość właściwą pary (co wymaga stosowania sprężarek przepływowych lub strumienicowych), a także konieczność utrzymania niskiego ciśnienia dla uzyskania niskich temperatur parowania.

Woda obecnie jest stosowana powszechnie jako czynnik ziębiczny w urządzeniach absorpcyjnych głównie z roztworem bromku litu, wyłącznie do uzyskania temperatur ziębienia powyżej 0°C, np. do celów klimatyzacji lub w technologii żywności (ryc. 10).

5.1. Woda jako czynnik ziębiczny w ziębiarce absorpcyjnej z roztworem wodnym bromku litu



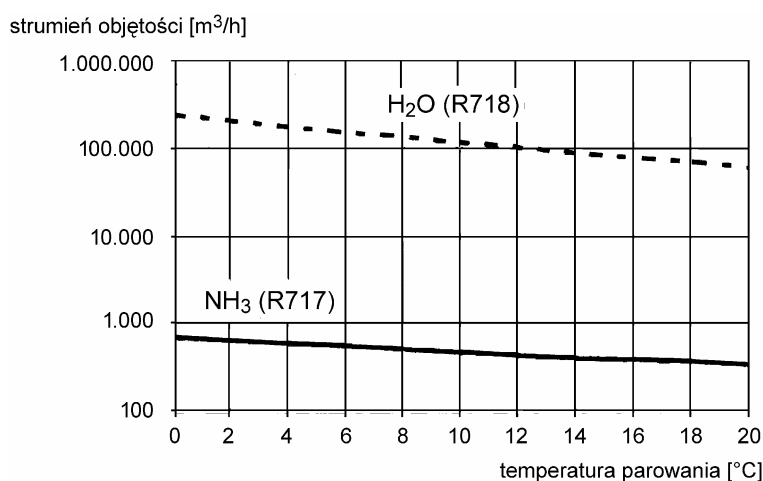
Ryc. 10. Schemat ideowy do realizacji obiegu absorpcyjnego z roztworem bromku litu (ziębnik – woda, roztwór bogaty z absorbera zawiera więcej ziębnika – wody) [19]

Fig. 10. Schematic diagram for absorption cycle with lithium bromide

Bromolitowa absorpcyjna ziębiarka lub pompa ciepła składa się z dwóch podstawowych obiegu. Pierwszy z nich to obieg zasadniczy ziębiarki lub pompy ciepła, w skład którego wchodzi skraplacz, parowacz, zawór rozprężny. Drugi to obieg tzw. sprężarki termicznej, która przejmuje rolę sprężarki z typowego obiegu sprężarkowego, w którym wyróżnia się absorber, wornik (desorber), wymyennik ciepła i pompę roztworu. Kosztem ciepła doprowadzonego z zewnątrz w worniku następuje odparowanie wody z roztworu bogatego. Roztwór bogaty jest roztworem bogatym w ziębnik – wodę. Z wornika para wodna przedostaje się do skraplacza. W skraplaczu dzięki odprowadzeniu ciepła do tzw. górnego źródła ciepła ziębnik ulega skropleniu. Skroplony ziębnik (woda) ze skraplacza płynie przez zawór rozprężny do parowacza, gdzie przejmując ciepło z dolnego źródła ciepła, odparowuje. Powstała para wodna przepływa z parowacza do absorbera, gdzie jest pochłaniana przez stężony roztwór bromku litu powracający z wornika (roztwór ubogi w wodę – ziębnik). Para przepływa do absorbera, gdyż ciśnienie pary wodnej nad powierzchnią wodnego roztworu bromku litu w absorberze jest niższe niż ciśnienie pary wodnej w parowaczu. Uwalniane ciepło absorpcji w procesie pochłaniania pary wodnej przez ciekły roztwór odprowadzane jest za pomocą wody chłodzącej absorber. Powstały w absorberze bogaty w wodę roztwór bromku litu tłoczony jest za pomocą pompy roztworu przez wymyennik ciepła do wornika. W wymyenniku ciepła roztwór ten jest podgrzewany kosztem ciepła odbieranego od uboższego (w wodę) roztworu opuszczającego wornik.

Wodę stosuje się również w sprężarkowych urządzeniach ziębniczych (agregat). Ta możliwość jest coraz częściej sygnalizowana w pracach naukowych i badawczych. Pojawiają się także informacje o rozwiązaniach prototypowych.

W Instytucie Klimatyzacji i Chłodnictwa Politechniki Drezdeńskiej (ILK Drezno) przeprowadzono badania dwustopniowego urządzenia ziębniczego (ziębiarka) z wodą jako czynnikiem ziębniczym, z zastosowaniem dodatkowego wymiennika ciepła międzystopniowego [18]. Nowością było wprowadzenie dwustopniowej turbosprężarki do pary wodnej w warunkach bliskich próżni (6–50 mbar). To nowe urządzenie działa w zakresie 500–1000 kW, zależnie od temperatury parowania. Zimna woda może być dostarczana w zakresie 0–20°C. Różnica ciśnień parowania i skraplania jest bardzo mała. Zastosowanie wody jako czynnika ziębniczego wymaga szczególnych warunków. Woda ma specyficzne własności termodynamiczne. W porównaniu z innymi czynnikami, np. z amoniakiem, przy tej samej wydajności ziębienia strumień objętości pary wodnej przepływającej z parowacza do sprężarki jest bardzo duży (ryc. 11). Obieg ziębienia odbywa się przy bardzo niskich ciśnieniach. Natomiast stosunek ciśnień powinien być w miarę duży. W porównaniu z innymi czynnikami COP jest dla wody stosunkowo niskie. A zatem, aby podnieść COP obiegu, należałoby zmniejszyć różnicę pomiędzy temperaturą powietrza zewnętrznego a wodą.

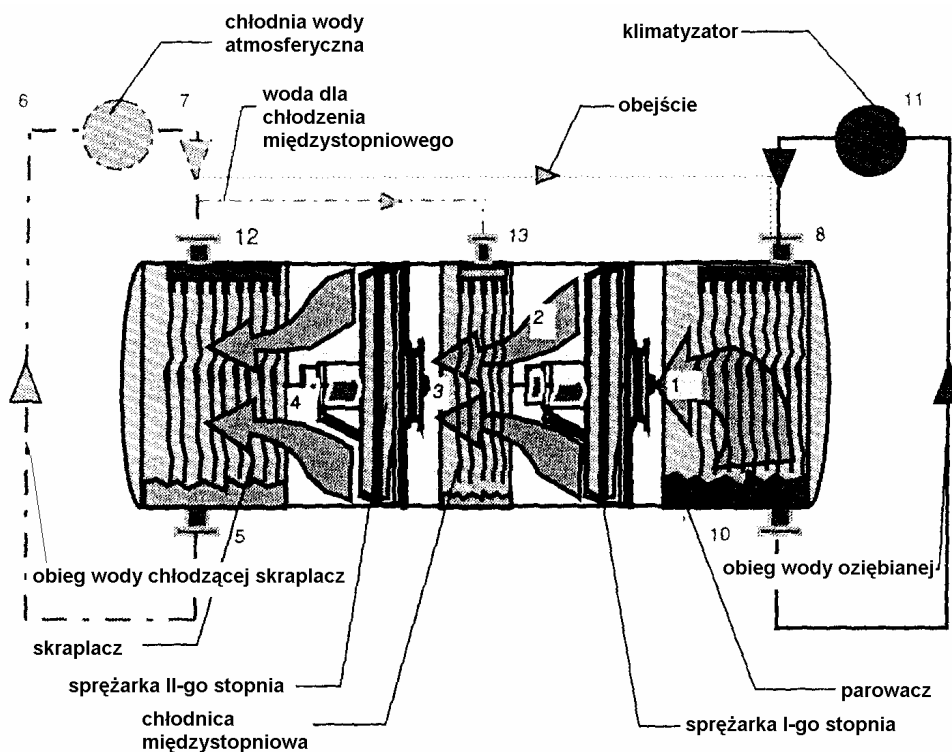


Ryc. 11. Porównanie strumienia objętości przy wydajności ziębienia 700 kW dla wody i amoniaku [18]

Fig. 11. Comparison the suction volume flow at a cooling capacity of 700 kW calculated both for water and ammonia as a refrigerants

Wymagany stosunek ciśnień przy tak dużym strumieniu objętości może być realizowany tylko w wielostopniowych turbosprężarkach. W tym nowatorskim przypadku zastosowano turbosprężarkę dwustopniową dla wody jako czynnika ziębniczego. Dla wydajności ziębienia około 800 kW potrzeba około 160 000 m³/h wody. Aby uzyskać stosunek sprężania 1,8–2,5, należy zastosować dwustopniowe sprężanie. Stosunek sprężania turbosprężarki jest w przybliżeniu proporcjonalny do kwadratu prędkości obrotowej wirnika. W celu osiągnięcia stosunku ciśnień 1,8–2,5 można zastosować sprężarkę z dużą prędko-

ścią obrotową i małymi gabarytami lub o dużej średnicy wirnika i umiarkowanej prędkości. W tej technologii wybrano jednowymiarowy wirnik i uzyskano prędkość 10 800 obr./min. Instalacja składa się z parowacza, skraplacza, sprężarek, chłodnicy międzystopniowej i systemu napędowego. Sprężarki są zintegrowane z hermetycznym systemem.



Ryc. 12. Schemat ziębiarki z dwustopniowym agregatem sprężarkowym z wodą jako czynnikiem ziębniczym [18]

Fig. 12. Schematic design of two stage refrigeration unit with water as a refrigerant

Od 1997 r. naukowcy dreźnieńscy prowadzą prace badawcze nad tak skonstruowanym urządzeniem (jakie przedstawiono na ryc. 12), w których główny nacisk kładzie się na sprawdzenie działania sprężarki.

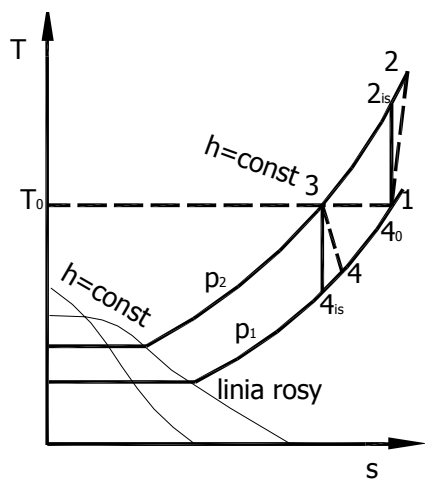
6. Powietrze

Powietrze znajduje dość często zastosowanie zarówno w instalacjach ziębniczych, klimatyzacyjnych, jak i wentylacyjnych. Jest to czynnik całkowicie bezpieczny dla człowieka, produktów spożywczych i środowiska naturalnego. Powietrze po raz pierwszy zostało użyte jako czynnik ziębniczy w 1834 r. w USA. Wyparte zostało jednak przez amoniak i freony. Jednak z powodu obecnego wycofywania freonów z użycia powietrze obok amo-

niaku staje się ponownie godnym uwagi ziębnikiem. Szczególnym zainteresowaniem cieszą się te instalacje w lotnictwie. Instalacje z powietrzem są proste w budowie, o niedużych gabarytach, niezawodne w eksploatacji, nie „zapowietrzają” się. Istnieje kilka typów instalacji klimatyzacyjnych z zastosowaniem powietrza. Obecnie spotyka się przede wszystkim instalacje realizujące tzw. obiegi otwarte. Stanowią one główny przedmiot badań.

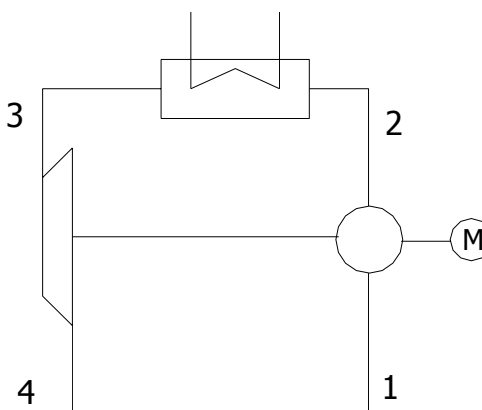
6.1. Realizacja obiegu Joule’a w klimatyzacji powietrza – innowacja [5]

Otwarty obieg Joule’a w klimatyzacji powietrza przedstawiono na wykresie T-s (ryc. 13a), a schemat ideowy zespołu do realizacji tego obiegu na ryc. 13b.



Ryc. 13a. Wykres obiegu Joule’a dla powietrza

Fig. 13a. Joule cycle's diagram for air



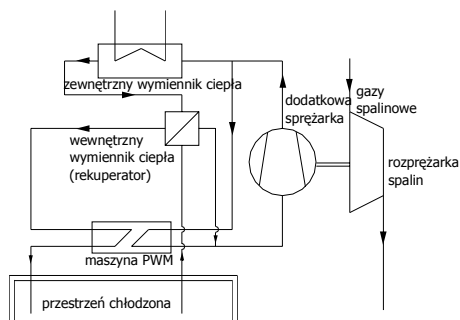
Ryc. 13b. Schemat ideowy instalacji

Fig. 13b. Schematic layout of system cooling

Sprężarka zasysa powietrze o stanie 1 przy ciśnieniu p_1 i spręża je do ciśnienia p_2 . Ciepło od sprężonego powietrza przekazywane jest do otoczenia w procesie przeciwprądowej wymiany ciepła, bez zmiany stanu skupienia. W rozprężarce następuje spadek ciśnienia od p_2 do p_1 , a rozprężone powietrze zimne wpływa do przestrzeni ziębionej. Praca odzyskana w rozprężarce może być wykorzystana do napędu sprężarki powietrza. Efektywność takiego sprężania uznawana jest jednak za względnie małą, a koszt zespołu instalacyjnego wysoki. Jako alternatywne rozwiązanie, tańsze i bardziej efektywne, została zaproponowana sprężarko-rozprężarka falowa PWM (*Pressure Wave Machine*). Maszyna ta – wynalazek opisany w publikacji [5], przystosowana do realizacji zmodyfikowanego obiegu z ryc. 13a, uzupełnia zespół wyposażenia ze schematu ryc. 13b o wyposażenie według schematu ryc. 14a umożliwiające uzyskanie charakterystyki jak na ryc. 14b.

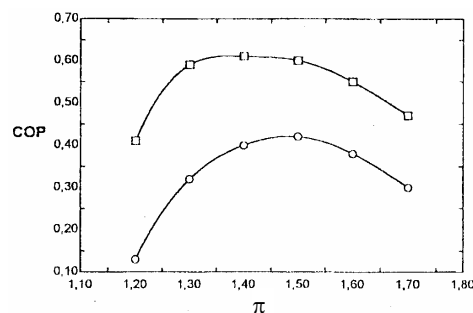
W rzeczywistych przemianach tylko niewielką część energii rozprężania daje się odzyskać w sprężarce i dlatego konieczny jest dodatkowy napęd rotora na pokonanie wszystkich strat tarcia. W rozważaniach teoretycznych (a także w badaniach i realizacji) wzięto pod uwagę zmodyfikowany układ klimatyzatora zastosowany w transporcie, w którym w sto-

sunku do schematu (ryc. 13a) (z użyciem maszyny PWM) wprowadzono dodatkową sprężarkę, działającą z napędem turbiny gazowej wykorzystującej spaliny silnika pojazdu spalinowego, oraz wspomagający rekuperator ciepła (ryc. 14a).



Ryc. 14a. Schemat ideowy klimatyzacji za pomocą efektu Joule'a z maszyną PWM rekuperatorem ciepła strumieni powietrza

Fig. 14a. Schematic layout of air conditioning unit with PWM and heat exchanger



Ryc. 14b. Teoretyczne wartości COP dla różnych stosunków sprężania $\pi = p_k/p_s$ (ciśnienie sprężania/ssania)

Fig. 14b. COP as a function of π with and without heat exchanger

7. Wnioski

Konieczność rezygnacji i eliminacji z zastosowań CFC i HCFC (tabl. 1) spowodowała podjęcie badań i poszukiwanie ich zamienników oraz związanych z tym nowych rozwiązań technicznych.

Nowe czynniki ziębnicze oprócz spełnienia podstawowych kryteriów chemicznych, fizycznych i termodynamicznych (takich, jakie stosowano przy doborze dotychczasowych ziębników) muszą spełniać kryteria bezpieczeństwa dla środowiska naturalnego.

Obecnie prace i badania kierowane są na tzw. naturalne czynniki ziębnicze, które nie powodują niszczenia warstwy ozonowej lub umożliwiają minimalizację wzrostu efektu cieplarnianego.

Żaden z naturalnych czynników ziębniczych w zastosowaniach nie spełnia wszystkich wymagań, nawet jeśli umownie nazywany jest proekologicznym. Zastosowanie go w urządzeniach ziębniczych jest wynikiem kompromisu pomiędzy jego zaletami i wadami.

Literatura

- [1] *Czynniki chłodnicze i nośniki ciepła*, praca zbiorowa pod red. Z. Boncy, Masta 1998.
- [2] Florek R., Reszewski S., *Substytuty ziębnika R22 – analiza własności termodynamicznych i użytkowych*.
- [3] Fodemski T., *Domowe i handlowe urządzenia chłodnicze*, WNT, Warszawa 2000.
- [4] Fröhling J. (Visteon), *CO₂ as a refrigerant for A/C and Heat Pump operation*, Phoenix 2000.

- [5] Halm P., Schmitz M., Pratsch M., Kruse H., *Air-Cycle Technology used for Truck Air-Conditioning*, 4th IIR-Gustav Lorentzen Conf. on Natural Working Fluids at Purdue, W. Lafayette, USA 2000.
- [6] Materiały firmy Volkswagen, CO₂ – A/C – system COP comparison R134a vs. CO₂, 2000.
- [7] PN-80/M-04612 Chłodnictwo – Symbole wielkości i jednostki miar.
- [8] PN-EN 378-1 Instalacje ziębnicze i pompy ciepła – Wymagania dotyczące bezpieczeństwa i ochrony środowiska – cz. 1: Wymagania podstawowe, definicje, klasyfikacja i kryteria wyboru, 2002.
- [9] PN-EN 378-2 Instalacje ziębnicze i pompy ciepła – Wymagania dotyczące bezpieczeństwa i ochrony środowiska, cz. 2: Projektowanie, budowanie, sprawdzanie, znakowanie i dokumentowanie.
- [10] PN-EN 378-3 PROJEKT, Instalacje ziębnicze i pompy ciepła – Wymagania dotyczące bezpieczeństwa i ochrony środowiska, cz. 3: Usytuowanie instalacji i ochrona osobista.
- [11] PN-EN 378-4 Instalacje ziębnicze i pompy ciepła – Wymagania dotyczące bezpieczeństwa i ochrony środowiska, cz. 4: Obsługa, konserwacja, naprawa i odzysk.
- [12] Skrzyniowska D., Muller J., Sikorska-Bączek R., Maczek K., *Zagrożenia bezpieczeństwa wynikające z zastosowania pomp ciepła do celów grzewczych i klimatyzacji*, Czasopismo Gaz, Woda i Technika Sanitarna 11/2005.
- [13] Skrzyniowska D., Wojtas K., Müller J., *Sprężarkowe agregaty ziębnicze dla potrzeb systemów klimatyzacji na początku XXI wieku, cz. I, Technologia chłodnicza w klimatyzacji. Zagadnienia teoretyczne*, Chłodnictwo i Klimatyzacja 11/2006.
- [14] Skrzyniowski A., Skrzyniowska D., *Searching for new alternative refrigerant for automobile air-conditioning*, Journal of Kones, Powertrain and Transport, Vol. 13, No. 1, 2006, 167-175.
- [15] Thevenot R., *A history of Refrigeration Throughout the World*, Paris, International Institute of Refrigeration.
- [16] Vaismann I.B., *Thermodynamic analysis of carbon dioxide cycles*, 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids at Purdue, West Lafayette, USA 2000.
- [17] Yunho H., Reinhard R., *Opportunities with alternative refrigerants*, Inter Society Conference of Thermal Phenomena, 2002.
- [18] Albring P., Heinrich G., *Turbo chiller with water as a refrigerant*, Natural Working Fluids'98, IIR-Gustav Lorentzen Conference, Oslo (Norway), June 2–5 1998.
- [19] Brak G., Cyklis P., *Symulacja pracy pompy ciepła LiBr-H₂O dla różnych zależności aproksymacyjnych*, Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, Niekonwencjonalne źródła energii 3/2004.