

ANDRZEJ SKRZYNIOWSKI\*, DOROTA SKRZYNIOWSKA\*\*

## DLACZEGO CO<sub>2</sub> W UKŁADACH KLIMATYZACJI SAMOCHODOWEJ?

### CO<sub>2</sub> IN MOBILE AIR CONDITIONING?

#### Streszczenie

Układy klimatyzacji w pojazdach samochodowych to obecnie jeden z podstawowych elementów wyposażenia pojazdów samochodowych. Stosuje się je w celu zapewnienia odpowiedniego komfortu cieplnego wewnątrz pojazdu. W tak określonych warunkach człowiek może osiągnąć maksymalne intelektualne i manualne zdolności. Instalacje zapewniające korzystne parametry środowiska wewnętrznego muszą być zaprojektowane zgodnie z obowiązującymi normami i przepisami, z uwzględnieniem zasad poszanowania energii oraz z zachowaniem niezbędnych środków bezpieczeństwa. CO<sub>2</sub> jest jednym z istotnych branych pod uwagę czynników naturalnych, jaki może zastąpić czynniki szkodliwe dla środowiska (np. R 134a).

*Słowa kluczowe: CO<sub>2</sub>, R744, dwutlenek węgla, ditlenek węgla, czynnik przyjazny środowisku, klimatyzacja samochodowa, mobilna klimatyzacja, MAC, ODP, GWP, ochrona środowiska, naturalne czynniki ziębnicze*

#### Abstract

Mobile air-conditioning system (Macs) is necessary units in cars. Air-conditioning devices create a thermal comfort for users. In such conditions, the worker can achieve maximum intellectual and manual abilities. All installations responsible for ensuring proper indoor environment must be designed according to regulations and standards and obeying energy saving rules and safety precautions. CO<sub>2</sub> is one of significant natural refrigerant used instead of destructive refrigerant (for example R 134a).

*Keywords: CO<sub>2</sub>, R744, carbon dioxide, sustainable refrigerant, mobile air conditioning, MAC, ODP, GWP, environmental protection, natural refrigerants*

\* Dr inż. Andrzej Skrzyniowski, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

\*\* Dr inż. Dorota Skrzyniowska, Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

## OZNACZENIA

- $h$  – entalpia właściwa [J/kg],  
 $p, p_o, p_k$  – ciśnienie, ciśnienie początkowe (parowania), ciśnienie końcowe (skraplania) [Pa],  
 $q_o, q_k$  – właściwe ciepło parowania, skraplania [kJ/kg],  
 $T, t, t_o, t_k$  – temperatura absolutna, temperatura, temperatura początkowa (parowania), temperatura końcowa (skraplania) [K], [°C].

## 1. Wstęp

Liczba samochodów wyposażonych w klimatyzację wciąż wzrasta. Na początku 2000 roku wynosiła 30%, w 2011 wzrosła dwukrotnie. Szacuje się, że obecnie ponad 80% nowych samochodów wyposażonych jest w klimatyzację. Mobilne urządzenia klimatyzacyjne (MAC) początkowo pracowały na R12. W latach 90. zamieniono czynnik R12 na R134a. Ale to stanowiło rozwiązanie połowiczne, ponieważ wpływ na efekt cieplarniany pozostaje (GWP = 1300).

Obecnie szacuje się, że 25–40% emisji związków z grupy fluorowanych węglowodorów jest spowodowane emisją czynnika R 143a z układów klimatyzacyjnych pojazdów samochodowych, co skłania do podjęcia działań w celu wyeliminowania R 134a w pierwszej kolejności z tej grupy zastosowań.

Jak wynika z oświadczeń przedstawicieli przemysłu motoryzacyjnego, prowadzone są intensywne działania nad opracowaniem i przebadaniem rozwiązań technicznych opartych na wykorzystaniu CO<sub>2</sub> jako czynnika ziębniczego w urządzeniach klimatyzacyjnych przeznaczonych dla pojazdów mechanicznych.

## 2. Układy klimatyzacji w pojazdach samochodowych

Instalacje do realizacji funkcji ziębiącej, a w szczególności do obniżania temperatury powietrza w kabinach samochodowych stwarzają możliwość zagrożenia dla osób, mienia i środowiska zewnętrznego. Awarie tych instalacji wnoszą dodatkowe, przez lata zaniedbywane zagrożenia dla całej gospodarki. W instalacjach ziębniczych wykorzystywane są jako ziębniki (czynniki ziębnicze – czynniki chłodnicze) również substancje zubożające warstwę ozonową zwane „substancjami kontrolowanymi” [2]. Negatywne skutki (efekt cieplarniany i dziura ozonowa) powodowane użytkowaniem ziębników szkodliwych dla środowiska spowodowały wycofywanie ich z urządzeń na mocy Protokołu Montrealskiego (1987 r.) [3]. W ich miejsce poszukuje się nowych, ale też sięga do już kiedyś stosowanych czynników, nieszkodliwych dla środowiska. Przykładem takich czynników są czynniki naturalne, takie jak: amoniak, woda, powietrze, węglowodory (propan, butan) i dwutlenek węgla.

Dwutlenek węgla to czynnik ziębniczy stosowany od początku istnienia instalacji ziębniczych, chociaż jest substancją łatwodostępną i tanią to jednak ze względu na wymagania wysokiego ciśnienia sprężania i niską temperaturę krytyczną, stosowany był w minionym okresie dość oszczędnie i został wyparty przez tzw. „doskonałe” freony (R11, R12, R13 i R22).

Ponieważ te ziębniki okazały się nie tak idealne jak przypuszczano (degradacja środowiska naturalnego-efekt cieplarniany, dziura ozonowa spowodowane wydostającymi się czynnikami z instalacji z powodu awarii np. w wyniku drgań i wstrząsów, upustu przez zawór bezpieczeństwa przy wzroście ciśnienia powyżej 16 MPa), na nowo poszukuje się czynników o własnościach termodynamicznych zbliżonych do własności freonów, ale nie szkodzących środowisku (np. czynniki nowej generacji jak HFO-1234yf firmy DuPont typu drop-in zastępujący R-134a; Tabela 1).

Tabela 1

### ODP i GWP dla wybranych powszechnie stosowanych czynników ziębnych

Czynniki ziębne		ODP	GWP
Chlorofluorowęglowodory	CFC-11	1	3800
	CFC12	1	8100
Wodorochlorofluorowęglowodory (tzw. freony)	HCFC-22	0,055	1500
	HCFC-141b	0,11	630
	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

Naturalne czynniki ziębne mogą być zamiennikami dotychczas stosowanych czynników wycofywanych ze względów ekologicznych. Zamiennosc ta jednak w wielu przypadkach wywołuje potrzebę rekonstrukcji istniejących instalacji lub stosowania innych materiałów i wyposażenia, a także nowych zasad projektowania instalacji między innymi także z powodu bezpieczeństwa (np. wybuchowość mieszanki powietrza i węglowodorów; Tabela 2).

Tabela 2

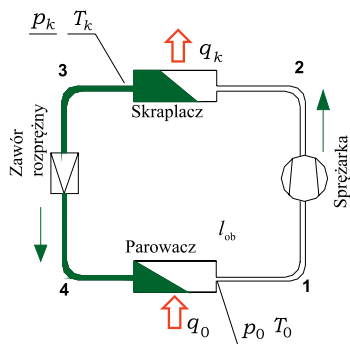
### Zamienniki ziębników – naturalne czynniki

Zamiennik	Amoniak R 717	Dwutlenek węgla	Węglowodory (Propan R 290 Izobutan )
dla	R 22, R 502	R 134 a (np. w klimatyzacji samochodowej ale z nową instalacją jak dla CO2)	R 12, R 502, R 22, R 134a

W typowych rozwiązaniach ziębiarek obieg ziębny 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.

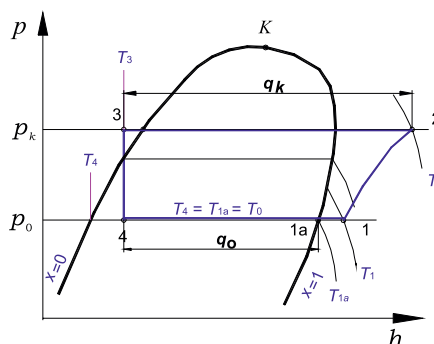
Typowy układ ziębiczny składa się z 4 elementów: sprężarki, skraplacza, parowacza, zaworu rozprężnego. Przy czym zawór rozprężny i sprężarka dzielą całe urządzenie na dwie części: stronę niskiego i stronę wysokiego ciśnienia (rys. 1). W czasie obiegu czynnik ziębiczny podlega przemianom fazowym [4].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

W drugim wymienniku ciepła (skraplaczu) następuje przekazanie przez czynnik ziębiczny do czynnika chłodzącego (np. otoczenia) wcześniej przejętego ciepła w parowaczu i ciepła pracy sprężania przy równoczesnym jego skropleniu (przemiana 2–3, rys. 2). Wymiana ciepła pomiędzy dwoma czynnikami jest możliwa tylko wówczas, gdy występuje między nimi różnica temperatur. Czynnik wykorzystywany do ziębienia musi więc mieć niższą temperaturę niż np. powietrze oziębiane. Dzięki temu czynnik zmienia stan w parowaczu z ciekłego na gazowy (rys. 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.



Rys. 1. Schemat ideowy zespołu realizującego obieg ziębiczny

Fig. 1. Schematic diagram of refrigerating cycle



Rys. 2. Obieg ziębiczny 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

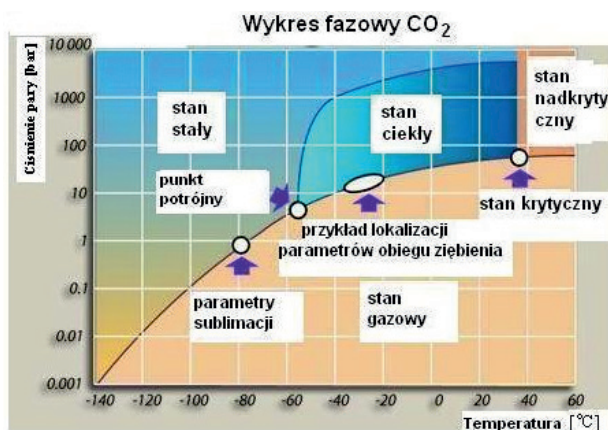
Fig. 2.  $p$ - $h$  chart of refrigerating cycle

### 3. Dwutlenek węgla R744 ( $\text{CO}_2$ )

Wybór zamiennika spośród akceptowalnych ziębników zależy od wymagań zastosowania i stanowi kompromis pomiędzy poszczególnymi własnościami. Za ziębienie w zakresie temperatur  $-50^\circ\text{C}$  do  $+10^\circ\text{C}$  obejmujących zastosowania dla mobilnych urządzeń klimatyzacyjnych (MAC), odpowiadają trzy naturalne czynniki ziębiczne: amoniak, propan,  $\text{CO}_2$ . Wybór spośród nich zależy od charakterystyki zastosowania. Po raz pierwszy  $\text{CO}_2$  został użyty w 1866 r. (146 lat temu). W 1881 użyty przez Lindego. Przez pół wieku aż do lat 30.  $\text{CO}_2$  było w powszechnym użyciu. Z powodu zupełnej nieszkodliwości  $\text{CO}_2$  był głównie używany na statkach, ale też w przemyśle spożywczym i urządzeniach klimatyzacyjnych. Na długie lata zaprzestano stosowania  $\text{CO}_2$ . Głównym powodem z jednej strony były freony doskonale termodynamicznie, a z drugiej fakt, że stosowanie  $\text{CO}_2$  na statkach dalekomorskich

plywających na morzach tropiku, gdzie temperatura przekraczała temperaturę krytyczną  $\text{CO}_2$  (31,1) powodowało szybki spadek wydajności urządzenia, wzrost mocy napędowej sprężarek i w ten sposób silne ich przegrzanie.

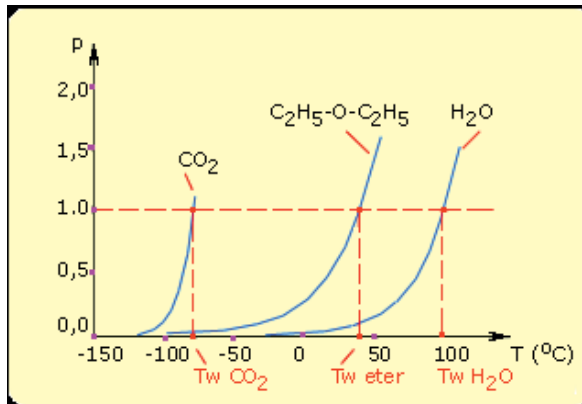
Z tą wadą zaczęto sobie skutecznie radzić dopiero, kiedy to w 1994 r. Gustav Lorentzen z Institute of Refrigeration Engineering (Norwegia) opublikował na konferencji żiębniczej pracę, w której wprowadził obieg transkrytyczny dla  $\text{CO}_2$  i zaproponował zastosowanie go w pompach ciepła i klimatyzacji samochodowej. Obieg transkrytyczny odbywa się częściowo w strefie podkrytycznej a częściowo w nadkrytycznej stąd nazwa transkrytyczny.  $\text{CO}_2$  jest prawie idealnym czynnikiem konkurencyjnym dla wszystkich innych branych pod uwagę.  $\text{CO}_2$  jest bezbarwny, niepalny, niewybuchowy, nietoksyczny, bezzapachowy, bakteriostatyczny, czyli bezpieczny dla człowieka, a przede wszystkim nie niszczy warstwy ozonowej i nie wywołuje efektu cieplarnianego a ponadto jest łatwodostępny, tani, dobrze pracuje z olejami i materiałami konstrukcyjnymi, bezpieczny w serwisowaniu i usuwaniu z instalacji, nie wymaga recyklingu. Stanowi doskonały zamiennik dla R 134a stosowany w klimatyzacji pojazdów samochodowych. Temperatura krytyczna dla  $\text{CO}_2$  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 (rys. 3).



Rys. 3. Wykres fazowy dla  $\text{CO}_2$  wraz z obszarem najczęstszych parametrów działania żiębniczego

Fig. 3. Phase diagram of  $\text{CO}_2$

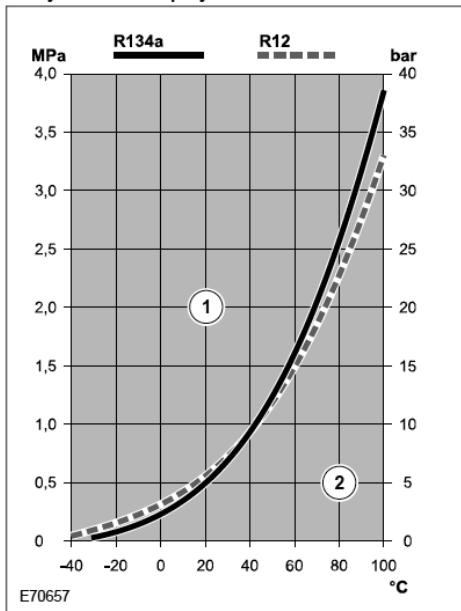
Dla porównania na rysunkach 4–7 przytoczono wykresy parametrów termodynamicznych dla R12, R134a,  $\text{H}_2\text{O}$ , propanu, butanu i mieszaniny 1:1 propan-butan.



Rys. 4. Zmiany ciśnienia pary nasyconej w zależności od temperatury dla dwutlenku węgla i porównanie z eterem di-etylowym i wodą

Fig. 4. Pressure of saturated vapour of  $\text{CO}_2$ , ethyl ether and  $\text{H}_2\text{O}$

Krzywa ciśnienia pary R134a i R12

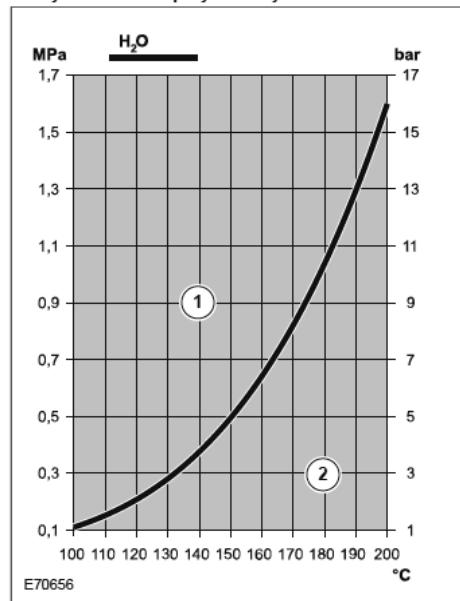


- 1 Stan ciekły
- 2 Stan gazowy

Rys. 5. Krzywe ciśnienia R134a i R12

Fig. 5. Pressure curve R134a and R12

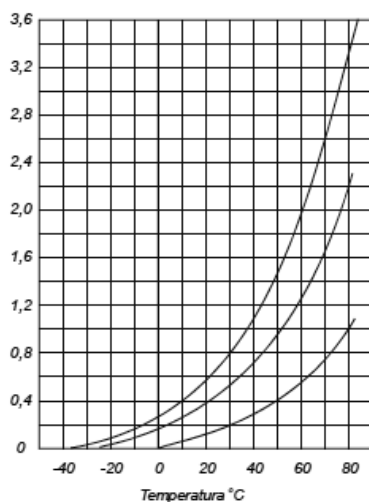
Krzywa ciśnienia pary wodnej



- 1 Stan ciekły
- 2 Stan gazowy

Rys. 6. Krzywa ciśnienia  $\text{H}_2\text{O}$

Fig. 6. Pressure curve of  $\text{H}_2\text{O}$



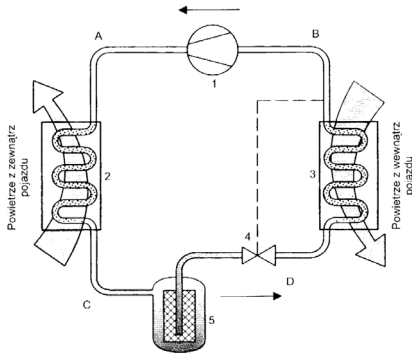
Rys. 7. Krzywe ciśnienia par propanu i butanu oraz ich z mieszaniny 1:1

Fig. 7. Pressure curve of propane and butane vapour

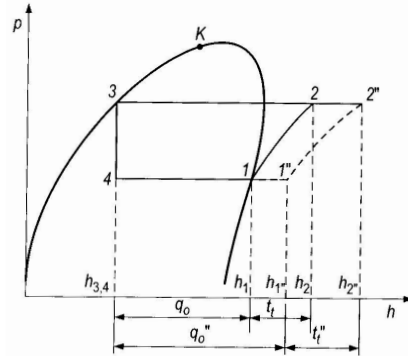
#### 4. Porównanie obiegów ziębicznych z CO<sub>2</sub> i R134a

Typowy układ ziębiczny składa się z 4 elementów: sprężarki, skraplacza, parowacza, zaworu rozprężnego. Przy czym charakterystyczne jest to, że zawór rozprężny i sprężarka dzielą całe urządzenie na dwie części: stronę niskiego i stronę wysokiego ciśnienia. Powietrze doprowadzane np. do wnętrza pojazdu jest schładzane w wymienniku ciepła (parowaczu) urządzenia klimatyzacyjnego. W tym czasie powietrze oddaje ciepło czynnikowi ziębicznemu. Czynnik odparowując w parowaczu, pobiera odpowiednią ilość ciepła od powietrza. W czasie obiegu czynnik podlega przemianom. Dzięki czemu możliwe jest chłodzenie powietrza za pomocą ograniczonej ilości czynnika ziębicznego. W drugim wymienniku ciepła (skraplaczu) następuje odebranie od czynnika ziębicznego wcześniej pobranego ciepła. Wymiana ciepła pomiędzy dwoma czynnikami jest możliwa tylko wówczas, gdy między nimi występuje różnica temperatur. Para czynnika musi więc mieć wyższą temperaturę niż powietrze zewnętrzne. Wykorzystywane do chłodzenia. Wskutek sprężenia pary czynnika w sprężarce osiągnana jest ok. 60–100°C.

Dlatego nawet wówczas, gdy jest ciepło, możliwe jest chłodzenie za pomocą powietrza napływającego z otoczenia (dzięki naturalnemu nawiewowi powietrza wywołanemu poruszaniem się samochodu lub tłoczonemu wentylatorem). Dzięki temu czynnik zmienia stan z gazowego na ciekły (rys. 8, 9).



Rys. 8. Schemat instalacji systemu klimatyzacji samochodowej z R134a: 1 – sprężarka, 2 – skraplacz, 3 – parowacz, 4 – zawór rozprężny, 5 – odwadniacz, A – czynnik chłodniczy w postaci gazu pod wysokim ciśnieniem, B – czynnik w postaci gazu pod niskim ciśnieniem, C – czynnik w stanie ciekłym pod wysokim ciśnieniem, D – czynnik chłodniczy w stanie ciekłym pod niskim ciśnieniem



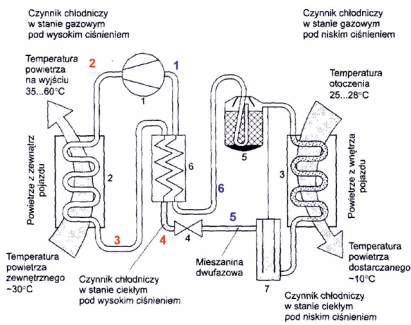
Rys. 9. Obieg ziębiczny dla R134a na wykresie p-h

Fig. 9. P-h diagram for refrigeration cycle with R134a

Fig. 9. Mobile air conditioning system with R134a

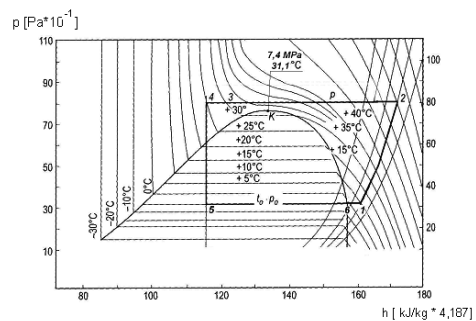
W układzie z CO<sub>2</sub> znajdują się sprężarka, parowacz, zawór rozprężny, tzw. ochładzacz gazu, i dodatkowo wymiennik ciepła (rys. 10).

Obieg jest częściowo realizowany w obszarze nadkrytycznym, co oznacza, że sprężarka wytłacza nie parę lecz gaz. Wówczas w skraplacz nie zachodzi proces skraplania pary czynnika, lecz ochładzanie gazu (rys. 11).



Rys. 10. Schemat instalacji systemu klimatyzacji samochodowej dla CO<sub>2</sub>: 1 – sprężarka, 2 – skraplacz 3 – parowacz, 4 – zawór rozprężny, 5 – osuszacz, 6 – wewnętrzny wymiennik ciepła, 7 – rozdzielacz faz

Fig. 10. Mobile air conditioning system with CO<sub>2</sub>



Rys. 11. Obieg ziębiczny dla CO<sub>2</sub> (transkrytyczny) na wykresie p-h

Fig. 11. P-h diagram for transcritical cycle



## 5. Wnioski

W dobie walki z globalnym ociepleniem, CO<sub>2</sub> przy braku innych zamienników jest najbardziej korzystnym czynnikiem chłodzącym, jaki można zastosować w układach klimatyzacji samochodowej. Układy z CO<sub>2</sub> od lat są testowane przez firmy specjalizujące się w zakresie samochodowych układów chłodzenia i systemów klimatyzacji (Behr, Delphi). Dodatkowym atutem CO<sub>2</sub> w porównaniu z R143a jest czas potrzebny na obniżanie temperatury we wnętrzu pojazdu wystawionego na działanie promieni słonecznych (zaparkowanego na słońcu). Np. obniżenie temperatury od 750 C do 240 C przez układ klimatyzacji z R744 i z R134a następuje o 6 minut szybciej [6]. Zatem jeśli nie powstanie inny czynnik chłodzący możliwy do zastosowania jako zamiennik dla szkodliwych, CO<sub>2</sub> pozostaje istotnym termodynamicznie i ekologicznie czynnikiem do zastosowań w klimatyzacji zarówno mobilnej, jak i stacjonarnej.

## Literatura

- [1] Skrzyniowski A., Skrzyniowska D., *Searching for new alternative refrigerant for automobile air-conditioning*, Journal of Kones, Powertrain and Transport, vol. 13, no. 1, 2006.
- [2] Ustawa z dn. 20 kwietnia 2004 r. o SZWO (Dz. U. Nr 121, poz. 1263 z późn. zm.).
- [3] *Protokół Montrealski w sprawie SZWO*, 1987.
- [4] Maczek K., Schnotale J., Skrzyniowska D., Sikorska-Bączek R., *Uzdatnianie powietrza w inżynierii środowiska dla celów wentylacji i klimatyzacji*, Politechnika Krakowska, podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych, wydanie poprawione i uzupełnione, Kraków 2010.
- [5] Skrzyniowska D., Sikorska-Bączek R., *Czynniki chłodzące naturalne jako proekologiczne w instalacjach klimatyzacyjnych inżynierii środowiska*, Czasopismo techniczne, 15-2007, Wydawnictwo PK, Kraków 2007.
- [6] *Obsługa klimatyzacji*, cz. 2, Kompendium praktycznej wiedzy, 2008.
- [7] Materiały firmy Audi i firmy Ford.