

# WPLYW DOBORU CZYNNIKA CHŁODNICZEGO NA MOŻLIWOŚCI MAGAZYNOWANIA CHŁODU W ZASOBNIKU ENERGII TERMICZNEJ AUTOBUSU MIEJSKIEGO

**Michał Aftyka**

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych

**Streszczenie.** *Energochłonność klimatyzacji pokładowej w elektrycznym autobusie miejskim w znacznym stopniu ogranicza zasięg pojazdu oraz pogarsza trakcyjne charakterystyki dynamiczne. Zastosowanie zasobnika energii termicznej na potrzeby utrzymania komfortu cieplnego w przestrzeni pasażerskiej stanowi atrakcyjną alternatywę dla układów klimatyzacji zasilanych z ogniw chemicznych. Aby efektywnie ładować zasobnik energii termicznej należy zastosować układ chłodniczy z wykorzystaniem odpowiedniego czynnika chłodniczego. Dobór czynnika chłodniczego wpływa bezpośrednio na ekonomiczność, niezawodność i bezpieczeństwo użytkowania układu klimatyzacji. W artykule został przedstawiony proces wielokryterialnego doboru czynnika chłodniczego ze szczególną uwagą na obowiązujące unormowania prawne. Dla czynnika, który wykazuje największą perspektywę zastosowania został przeprowadzony szereg symulacji, w oparciu o komercyjne środowisko programowe. Niniejsze opracowanie zostało dopełnia przegląd wybranych źródeł.*

**Słowa kluczowe:** Zasobnik chłodu, elektryczny autobus miejski, czynnik chłodniczy

## IMPACT OF THE REFRIGERANT SELECTION ON THE COLD STORAGE POSSIBILITIES IN A THERMAL ENERGY ACCUMULATOR OF AN URBAN BUS

**Abstract:** *Energy consumption of air conditioning on board in the electric city bus significantly reduces the scope of the vehicle and the traction deteriorates dynamic characteristics. The use of thermal energy storage on the need to maintain thermal comfort in the passenger compartment is an attractive alternative to air-conditioning systems powered by chemical cells. In order to effectively charge the thermal energy storage cooling system to be applied by an appropriate refrigerant. The choice of refrigerant directly affects the efficiency, reliability and safety of the air conditioning. The article was presented the process of multi-criteria selection of refrigerant with particular attention to the applicable legal regulations. For an agent that exhibits the greatest prospects of use for a series of simulations it was carried out based on the commercial software environment. This study has been complemented by a review of selected refrigerant.*

**Keywords:** Tray cold, electric city bus, refrigerant,

### Wstęp

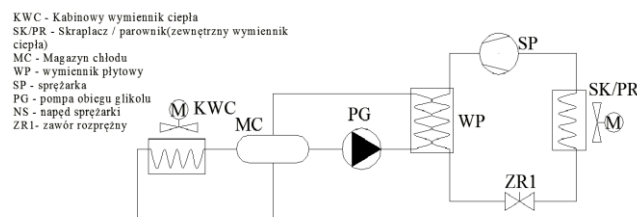
Elektryczny autobus miejski jest przyszłością komunikacji miejskiej. Obowiązujące normy emisji CO<sub>2</sub> skłoniły przewoźników komunikacji miejskiej do wprowadzenia nowoczesnych autobusów miejskich, zasilanych elektrycznie. Podczas eksploatacji pojazdu napędzanego silnikiem z cyklem Diesla lub Otta powstaje odpadowa porcja energii cieplnej [9]. Energię taką w konwencjonalnych pojazdach zużywa się zimą do ogrzewania przestrzeni pasażerskiej. Pojazdy z napędem elektrycznym nie posiadają w swoich konstrukcjach mechanizmów wytwarzających znaczne porcje energii termicznej, w procesie ubocznym produkcji energii kinetycznej pojazdu. Inną potrzebą jest chłodzenie wnętrza autobusu w sezonie letnim. Typowo wyprowadzanie energii termicznej z kabiny pasażerów odbywa się za pomocą chłodziarki parowej napędzanej z wału silnika spalinowego. Dlatego respektując potrzeby komfortu pasażerów w elektrycznych autobusach komunikacji miejskiej energię do ogrzewania lub chłodzenia należy wytworzyć bądź zakumulować. Akumulacja energii elektrycznej koniecznej do wytworzenia ciepła lub chłodu jest wysoce nieefektywna. Za podstawowe problemy ogniw chemicznych można uznać ograniczoną liczbę cykli – ściśle uzależnioną od głębokości rozładowywania oraz stosunkowo niezadowalający współczynnik masy do energii zakumulowanej [8].

Jako przedmiot badań prowadzonych w Katedrze Maszyn i Napędów Elektrycznych Politechniki Lubelskiej został opracowany nowatorski układ zasilania klimatyzacji elektrycznego autobusu miejskiego. Zaprojektowany układ klimatyzacji wykorzystuje zasobnik energii termicznej. Proces ładowania zasobnika odbywa się za pomocą maszyny termodynamicznej z odwróconym cyklem Carnota. Zważając na energochłonność, niezawodność i bezpieczeństwo pasażerów dobór odpowiedniego czynnika chłodniczego jest kwestią zasadniczą. Zastosowany czynnik wywiera bezpośredni wpływ na: wydajność i sprawność układu ładowania zasobnika, na temperaturowy zakres pracy ładowania, na toksyczność, oraz na niską końcową temperaturę sprężania. Problem doboru czynnika należy rozpatrywać wielokryterialnie ponieważ będzie stanowił o

mniejszym zużyciu energii elektrycznej do napędu sprężarki, a także na dużą jednostkową wydajność chłodniczą. Wybierając odpowiedni czynnik można zmniejszyć masy i wymiary aparatów chłodniczych a także wpłynąć na mniejszą szkodliwość pojazdu dla środowiska naturalnego. Powyższe parametry wpływają także na parametry trakcyjne pojazdu w tym: charakterystyki dynamiczne, sprawność, zasięg autobusu elektrycznego. Artykuł opisuje problemy doboru czynnika chłodniczego przeznaczonego do uposażania zasobnika chłodu poprzez pokładową chłodziarkę parową. Dodatkowo praca została wzbogacona symulacjami, opisem działania zasobnika chłodu i przeglądem współczesnych czynników chłodniczych.

### 1. Działanie zasobnika chłodu

Zasobnik chłodu magazynuje energię termiczną w postaci ciepła utajonego, współcześnie zwanego ciepłem entalpii przejścia fazowego [14]. Ładowanie zasobnika ujemną energią chłodu czyli wyprowadzanie energii cieplnej z zasobnika odbywa się za pomocą obiegu chłodniczego, opisywanego lewobieżnym cyklem Lindego [10, 16, 20]. Obieg chłodniczy zbudowany jest z czterech podstawowych elementów: sprężarki, skraplacza, zaworu rozprężnego i parownika. Transport energii termicznej pomiędzy wymienionymi urządzeniami odbywa się za pomocą czynnika chłodniczego.



Rys. 1. Schemat układu chłodniczego [20]

Zasobnik energii termicznej ładowany jest za pomocą dwóch obiegów: obiegu chłodniczego; szeregowo z glikolowym obiegiem hydraulicznym o wymuszeniu pompowym [20].

W obiegu chłodniczym – parowym znajduje się czynnik chłodniczy. Czynnik ten ulega przemianom sprężania, skraplania, dławienia, wrzenia, podczas których dochodzi do transportu energii termicznej z parownika do skraplacza. Obieg hydrauliczny z obiegiem chłodniczym sprzęga cieplnie wymiennik płytowy. Wymiennik po stronie układu chłodniczego jest parownikiem a po stronie układu hydraulicznego chłodnicą do odbierania energii termicznej. Płyty wymiennika przekazują *chłód* z obiegu chłodniczego do hydraulicznego. Powoduje to, że układ chłodniczy jest ściśle sprzężony termicznie z układem glikolowym, którego zadaniem jest przekazywanie bezpośrednio energii do zasobnika [20].

Rozładowywanie może odbywać się przy pomocy układu glikolowego i chłodnicy powietrznej w kabinie pasażerów. Tak skonstruowany system pozwala na gromadzenie chłodu w zasobniku energii termicznej autobusu miejskiego przy różnym czynniku chłodzącym i swobodne dysponowanie chłodem na potrzeby utrzymania komfortu cieplnego wewnątrz pojazdu. Istotne jest aby proces ładowania zasobnika był możliwie szybki i mało kosztochłonny.

## 2. Podział czynników chłodniczych i ich oznaczenia

Czynnik chłodniczy zwany również żiębnikiem znajdujący się w obiegu chłodniczym posiada wiele właściwości fizycznych, chemicznych które rzutują na funkcjonowanie chłodziarki a także całego układu wymiany ciepła. Tymi parametrami są: aktywność chemiczna, trwałość, palność, wybuchowość, ciśnienie, temperatura skraplania oraz parowania, punkt krytyczny, ciepło parowania, ciepło właściwe, rozpuszczalność wody i olejów, lekkość, przewodność ciepła, napięcie powierzchniowe, toksyczność oraz zapach. Powstało wiele wyidealizowanych modeli czynnika chłodniczego [4] i wedle założeń miałby się on charakteryzować parametrami:

- wysoka wartość temperatury krytycznej, który wpływa bezpośrednio na mniejsze straty entalpii parowania,
- niski punkt krzepnięcia, który określa zakres pracy czynnika żiębniczego,
- mała masa cząsteczkowa,
- duża wartość utajonego ciepła parowania przez co czynnik posiada mniejsze straty entalpii na dławieniu,
- maksymalną wydajność chłodniczą  $q_o$ , która wpływa na mniejszy strumień masy czynnika i mniejsze gabaryty urządzenia chłodniczego,
- niska jednostkowa teoretyczna praca sprężarki rozumiana jako energia, którą trzeba doprowadzić do jednego kilograma czynnika o ciśnieniu parowania  $p_o$ , aby sprężyć izentropowo do ciśnienia skraplania  $p_k$ . Należy uznać, że im energia jest niższa tym mniejszy jest nakład energii,
- mała objętość właściwa pary nasyconej - suchej przez co można zamontować mniejszą sprężarkę o mniejszej objętości ekwiwalentnej,
- niska ujemną temperaturę wrzenia w warunkach normalnych,
- wysoki współczynnik przejmowania ciepła,
- jednorodność składu chemicznego [4, 5, 13, 16].

Czynniki chłodnicze, które są dopuszczone do transportu energii można podzielić na syntetyczne i naturalne. Do naturalnych zalicza się: Amoniak NH<sub>3</sub> oznaczony R717, dwutlenek węgla R744, propan R290, mieszanka propanu z izobutanem C4H10 oznaczona R600a, lub mieszanina propanu z etanem R170, propylen R1270. Do syntetycznych należą substancje zubażające warstwę ozonową – SZWO, do których należą czynniki typu CFC (Chloro Fluoro Carbon) np. R12, HCFC (Hydro Chloro Fluoro Carbon) R22, R123, R124, R142b, R401a, R402a, - wycofane z rynku od 1996r. oraz czynniki grupy F-gazy (gazy fluorowe) stosowane w urządzeniach chłodniczych do 2015r. a mianowicie: HFC (Hydro Fluoro Carbon), substancje jednorodne: R134a, R125, R32, R143a, R152a, a także mieszanki: R404a, R407c R410A, R417A, R422A/D. Trzecią

grupą jest grupa czynników chłodniczych którą charakteryzuje niski współczynnik GWP (Global Warming Potential). Do grupy tej należą czynniki z rodziny HFO (hydrofluoro-olefiny) np. substancje jednorodne: R1234yf, HFO-1234ze. Czynniki R12 i R22 posiadają dobre właściwości termiczne, jednak ich ujemny wpływ na środowisko wymusił usunięcie ich z zastosowania chłodniczego. W europejskich krajach wysokorozwiniętych wprowadzono ustawę o substancjach zubożających warstwę ozonową [4]. Wspomniane rozporządzenie szeroko traktuje konieczność eliminacji fluorowych i fluorowo – chlorowych pochodnych fluorowych żiębników z grup F-gazów, SZWO. W wyniku tego powstało wiele substytutów dla substancji o znacznym potencjale niszczenia warstwy ozonowej i tworzenie efektu cieplarnianego. Jako techniczne przykłady wymienia się: R123, R401a, R401b, R401C, R409A jako substytuty dla czynnika R11. Natomiast czynnik chlorowy R22 zastępuje się czynnikami: R152a, R404a, R407C, R410A, R410B. Czynniki chłodnicze możemy podzielić również na:

- czynniki chłodnicze ze stosunkowo niską temperaturą wrzenia,
- czynniki mroźnicze z bardzo niską temperaturą wrzenia.

Wybrane temperatury wrzenia przedstawia tabela 1. Z perspektywy zastosowania w komunikacji istotna jest klasyfikacja czynników pod względem bezpieczeństwa. Odnosząc się do palności zostały zdefiniowane następujące klasy:

- klasa 1 – oznacza, że czynnik nie rozprzestrzenia ognia w warunkach testowych od 60°C do 101°C, przy ciśnieniu 3kPa,
- klasa 2 oznacza niższą palność, wymagane jest co najmniej 3,5% stężenie czynnika w powietrzu, a czynnik rozprzestrzenia ogień w warunkach testowych od 60°C do 101°C przy ciśnieniu 3 kPa.
- klasa 3L oznacza słabą palność (podklasa propanowa) wymagane jest co najmniej 3,5% stężenie czynnika w powietrzu, a czynnik rozprzestrzenia ogień w warunkach testowych od 60°C do 101°C przy ciśnieniu 3 kPa oraz maksymalna prędkość spalania <10 cm/s.
- klasa 3 oznacza wyższą palność i wymagane jest co naj mniej 3,5% stężenia w powietrzu a czynnik rozprzestrzenia ogień w warunkach testowych od 60°C do 101°C, przy ciśnieniu 3kPa.

Według normy ISO817 albo PN-90/M-04611 czynniki chłodnicze możemy oznaczać następująco:

- seria 100 (chlorowce pochodne etanu C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>),
- seria 200 (chlorowce pochodne propanu C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>),
- seria C300 (chlorowce pochodne cyklobutanu C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>),
- seria 400 (mieszanki roztworów),
- seria 500 (azeotropowe czynniki chłodnicze),
- seria 600 (związki organiczne),
- seria 700 (związki nieorganiczne),
- seria 1000 (chlorowce będące pochodnymi węglowodorów nienasyconych).

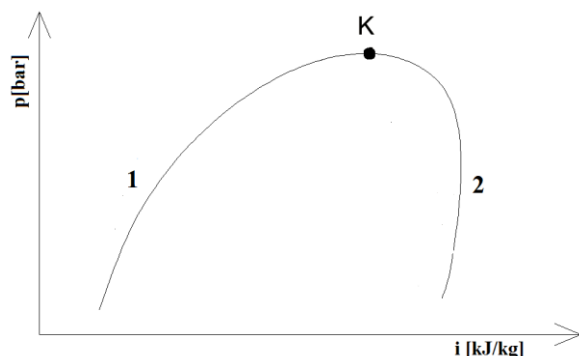
Celem odróżnienia żiębnika od innej, technicznej odmiany gazu przed symbolem liczbowym gazu umieszcza się dużą literę R (ang. *Refrigerant*) – czynnik chłodniczy. Ostatnia liczba oznacza liczbę atomów fluoru (F), przedostatnia określa liczbę atomów wodoru (H) w cząsteczce. Trzecia cyfra licząc od prawej oznacza zmniejszoną o jedność liczbę atomów węgla C. Gdy trzecia liczba jest równa 0 i pomija się ją w oznaczeniu.

Europejska norma EN378 dzieli czynniki chłodnicze na trzy klasy:

- L – oddziaływanie bezpośrednie na otoczenie,
- G – potencjał tworzenia efektu cieplarnianego,
- O – potencjał niszczenia ozonu.

Czynniki typu CFC (chlorofluorowęglowodory) przyczyniły się znacząco w latach 70-tych do zwiększenia efektu cieplarnianego [4, 5, 13]. W związku z tym wprowadzono wskaźnik GWP. Nadaje on ilościowy układ odniesienia wpływowi danego czynnika chłodniczego na efekt cieplarniany. Im wartość tego współczynnika jest wyższa tym oddziaływanie jest większe. Ze względu na ochronę klimatu ograniczono stosowania

czynników CFC (ChloroFluoroCarbon) oraz HCFC (hydroChloroFluoroCarbon). Ponadto planowane jest całkowite wycofanie z użycia czynników HFC o współczynnikach GWP wynoszących ponad 2500 – i to najpóźniej od stycznia 2020 r., a bardzo prawdopodobne, że już nawet od 2016 r. lub 2017 r. Czynniki HFC o  $GWP > 2500$  to między innymi R404A, R507, R419A, R422A, R422D, MO89, R23 oraz jednoskładnikowe R125 i R143a, R134a. W celu przedstawienia zmian stanu zachodzących w instalacjach chłodniczych podczas procesów sprężania, skraplania, dławienia i wrzenia, oraz do bezpośredniego odczytania ciepła odpowiadającego tym procesom, używa się opracowanego przez von Molliera wykresu termodynamicznego w układzie ciśnienie – entalpia właściwa ( $p-h$  lub  $i$ ) sporządzany jest wykres dla wszystkich płynów niskowrzących. Wykres poglądowy przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Przykładowy przebieg linii przemian termodynamicznych do czynnika chłodniczego [9, 10]

Punkt krytyczny K posiada dwie krzywe krzywa 1 i krzywa 2. Na lewo od punktu K znajduje się krzywa 1 z obszarem ciekłego czynnika chłodniczego, natomiast na prawo od punktu K znajduje się krzywa 2 z obszarem pary przegrzanej. Obszar pary mokrej leży pomiędzy obiema krzywymi i to właśnie w nim zachodzą procesy odparowania i skraplania. Od strony prawej do lewej zachodzi skraplanie, natomiast od lewej do prawej, proces odwrotny czyli parowanie [10, 17, 19].

### 3. Właściwości czynników chłodniczych z uwzględnieniem możliwości stosowania w instalacjach komunikacji miejskiej

Wymienione w poprzednich działach czynniki chłodnicze mają zbliżone właściwości termiczne, jednak w instalacjach komunikacji miejskiej nie wszystkie mogą pracować. Głównym powodem jest wybuchowość oraz toksyczność. Wybuchowość czynnika chłodniczego podlega dyskusji, ponieważ paliwa ropopochodne a nawet niektóre substancje smarne stosowane w klasycznych pojazdach wykazują wybuchowość na wyższym poziomie. Wybuchowość np. węglowodorów lokuje je w grupie bezpieczeństwa A3. Oznacza to, że handlowe urządzenia chłodnicze z typową ilością czynnika w układzie muszą być wykonane zgodnie z odpowiednimi przepisami przeciwybuchowymi, takimi jak urządzenia przeciwdziałające nadmiernemu wzrostowi ciśnienia oraz stosowanie specjalnej instalacji elektrycznej. Wymagana też jest niezawodna wentylacja pomieszczeń, w których w przypadku wycieku mogło by dojść do powstania palnej mieszaniny czynnika chłodniczego z powietrzem. Czynnik R744 posiada grupę bezpieczeństwa A1, R717 B2L, R32 – B2L, R1234zef – A2L, R600a – A3, R290- A3, R1270 – A3.

Najbardziej powszechnym czynnikiem chłodniczym jest R134a. Czynnik ten jest niepalny i nie toksyczny. Stosowany jest w motoryzacji i chłodziarkach niskotemperaturowych. Posiada dobre właściwości termodynamiczne, pomimo że instalacja z tym czynnikiem charakteryzuje się wyższym ciśnieniem skraplania oraz niższym ciśnieniem parowania. Temperatura wrzenia wynosi  $-26,3^{\circ}\text{C}$ , natomiast temperatura jego topnienia wynosi  $101^{\circ}\text{C}$ .

Niekorzystnym parametrem tego czynnika jest współczynnik GWP wynoszący 1300, co powoduje jego ograniczenie. Jako zamienniki o lepszych parametrach oraz współczynniku GWP zastosowano R507 i R404A. Współczynnik GWP dla czynnika R507 wynosi 3985. Zalecenia Unii Europejskiej ograniczają stosowanie czynników o  $GWP > 2500$ . W związku z tym proponuje się stosowanie dwóch czynników chłodniczych spełniających europejskie normy ekologiczne: HFO1234yf (określany też symbolem R1234yf) bądź też R744, czyli dwutlenek węgla. Oba ziębniki mają swoje wady i zalety. Charakterystyka termodynamiczna HFO 1234yf jest bowiem bardzo zbliżona do R134a. Temperatura wrzenia wynosi  $-29^{\circ}\text{C}$ . Czynnik ten jest mniej wydajny w przenoszeniu energii cieplnej od R134 o około 8–10% co wpływa na wydajność układów chłodniczych [11]. Powoduje to zwiększenie zużycia energii potrzebnej do zasilania sprężarki. Czynnik ten jest przyjazny środowisku – jego indeks GWP wynosi zaledwie 4. HFO 1234yf określany jest przez producentów jako „średnio palny”. Do jego zapłonu dochodzi w temperaturze  $405^{\circ}\text{C}$ . Jest ona dość wysoka. W samochodowych instalacjach klimatyzacyjnych może dochodzić do pożarów czynnika chłodniczego co potwierdzają badania koncernów motoryzacyjnych. Czynnik ten można zastosować w układzie klimatyzacji samochodowej pod warunkiem zastosowania specjalnych przewodów. Wadą tego czynnika jest jego wysoka cena. Czynnik R290 (propan) jest bardzo ekologicznym współczynnikiem o GWP wynoszącym 0. Posiada on lepszą efektywność chłodzenia o około 10 do 15% w porównaniu z czynnikiem R134a. Temperatura parowania tego czynnika wynosi  $-42^{\circ}\text{C}$ , natomiast temperatura krytyczna  $97^{\circ}\text{C}$ . Propan jest czynnikiem wybuchowym i z tego względu stosowany jest w urządzeniach autonomicznych np. w zamrażarkach. Współczynnik GWP dla czynnika R 744 wynosi zaledwie 1. Dwutlenek węgla w instalacjach chłodzących nie jest nowym rozwiązaniem. Gaz ten był powszechnie wykorzystywany od XIX wieku do lat 20. XX wieku. Dwutlenek węgla wyparty został jednak przez czynniki z grupy CNC (fluoryzowanych węglowodorów), dzięki którym systemy chłodnicze mogły pracować przy znacznie niższym ciśnieniu roboczym. Wysokie ciśnienie, jakiego wymaga  $\text{CO}_2$  jest główną przeszkodą w jego zastosowaniu w samochodowych układach klimatyzacji. W systemach przeznaczonych do pracy z  $\text{CO}_2$  ciśnienie dochodzi do 150 barów, zaś w „tradycyjnej” instalacji nie przekracza ono 30 barów. Zastosowana sprężarka w instalacji z  $\text{CO}_2$  winny mieć więc znacznie większą wydajność, a wymienniki ciepła, przewody, zawory itd. powinny być przystosowane do znacznie większych obciążeń. W instalacjach z dwutlenkiem węgla należy zastosować inne skraplacze ponieważ nie dochodzi w nich do skraplania czynnika chłodzącego. Funkcję wymiennika ciepła pełni chłdnica gazu posiadająca inną konstrukcję niż tradycyjne skraplacze. Spełnienie tych wszystkich wymogów technicznych sprawia, że układ przystosowany do pracy z dwutlenkiem węgla jest znacznie droższy. 15 maja 2015 r. wprowadzona została ustawa, która reguluje w Polsce warunki stosowania czynników SZWO oraz czynników HFC czyli F-gazów. Nakazuje ona prowadzenie dokumentacji przez operatorów urządzeń chłodniczych. Wymagane jest posiadanie certyfikatów dla personelu oraz przedsiębiorców, oraz rejestrację wykwalifikowanego personelu, prowadzenie karty urządzenia, w której należy zamieścić: dane dotyczące ilości i rodzaju substancji kontrolowanej albo fluorowanego gazu cieplarnianego zawartego w urządzeniu w momencie sporządzenia karty oraz wszelkich ilości substancji albo gazu dodanych i odzyskanych podczas wykonywania czynności eksploatacyjnych.

### 4. Dobór czynnika chłodniczego do elektrycznego autobusu miejskiego

Potencjał zastosowania w pojeździe elektrycznym wykazuje wiele ziębników, jednak autobus z racji swojej funkcji musi przede wszystkim spełniać normy bezpieczeństwa [4, 13]. W związku z tym można by wnioskować, że konkurencyjny i nowoczesny termodynamicznie czynnikiem HFO1234yf był by

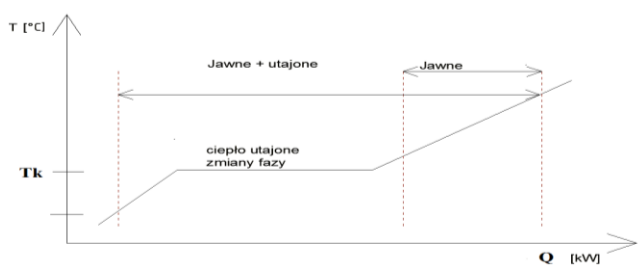


odpowiedni. Jednak biorąc pod uwagę, że w temperaturze 400°C [1, 7] wykazuje właściwość palną – nie można jednoznacznie stwierdzić, że spełnia warunek jakim jest zachowanie odpowiedniego bezpieczeństwa dla pasażerów oraz osób znajdujących się w pobliżu autobusu. Czynnik ten wprowadzany jest do motoryzacji. Przewidywany jest rozwój technologiczny układów chłodniczych z tym czynnikiem.

Fizyczne parametry propanu, butanu i ich mieszanin mogłyby pozwolić na wykorzystanie ich w układzie chłodzarki autobusu komunikacji miejskiej. Jednak palność tych czynników wyklucza ich stosowanie. Atrakcyjność techniczną tych czynników poprawia mieszalność z większością olejów mineralnych, syntetycznych i wody [4, 13].

Górne źródło ciepła powinno pracować przy różnicy temperatur otoczenia i skraplania. Chcąc utrzymać wydajność układu ładowania zasobnika chłodu można założyć, że gradient temperatury górnego źródła powinien wynosić minimalnie 20°C. Oznacza to, że gdy temperatura otoczenia wyniesie 40°C to temperatura skraplania powinna przekroczyć 60°C. Temperatura skraplania musi być wyższa od temperatury otoczenia, ponieważ taki stan spowoduje samorzutny przepływ ciepła z ciała o temperaturze wyższej do niższej czyli w przypadku autobusu miejskiego ze skraplacza do powietrza atmosferycznego [3, 19].

Aby zapewnić efektywność ładowania zasobnika chłodu poniżej temperatury przejścia fazowego wody i utrzymać odpowiedni bilans potencjałów termodynamicznych czynnik chłodniczy powinien wrzeć w temperatury od -15 do -10°C. Taki zakres temperatur uwzględniono w symulacjach. Rys. 3 przedstawia bilans ciepła jawnego i utajonego wody.



Rys. 3. Bilans ciepła jawnego i utajonego w przejściu fazowym wody

Temperatura parowania ziębniaka nie powinna być zbyt niska ze względu na ograniczenie przepływu glikolu, którego lepkość kinematyczna rośnie wraz ze spadkiem temperatury [20]. Ponadto można uznać, że większość energii ładowana jest do zasobnika na granicy przejścia fazowego [12].

Odnosząc się do powyższego opisu ziębniaków można uznać że zastosowanie dowolnego z nich niesie określone korzyści ale także obarczone jest problemami technicznymi. Czynniki z grupy chlorowcopochodnych posiadają dobre właściwości fizyczne jednak ich emisja do atmosfery wiąże się z problemami ekologicznymi. Fakt ten uniemożliwia ich aplikację. Czynnikiem szeroko stosowanym w chłodnictwie pojazdów samochodowych jest R134a. Właściwości fizyczne tego czynnika spełniają wymagania chłodzarki ale przeciwwskazaniem do jego aplikacji jest wysoki współczynnik GWP. Właściwość GWP oraz parametry termodynamiczne spełnia czynnik HFO1234yf. Wybrane parametry czynników przedstawia tabela 1.

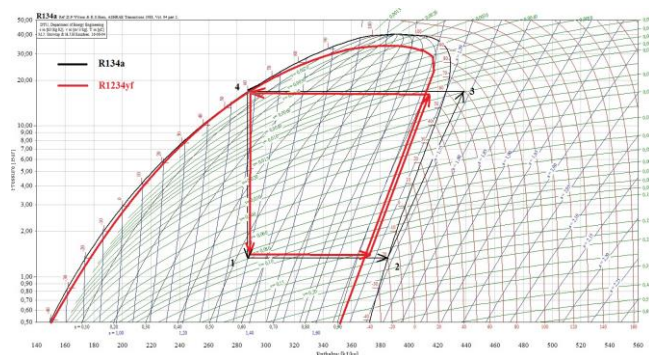
Tab. 1 Porównanie parametrów czynników R134a i HFO1234yf [1, 2, 15, 18]

Nazwa	R134a	HFO 1234yf
Temperatura zapłonu	Nie dotyczy	405 [°C]
Ciśnienie krytyczne	40,59 [bar]	33,82 [bar]
Temperatura krytyczna	101,06 [°C]	94,70 [°C]
Temperatura wrzenia	-26,07 [°C]	-29,45 [°C]
Gęstość dla 25°C	1206 [kg/m <sup>3</sup> ]	1100 [kg/m <sup>3</sup> ]
Masa molowa	102,03 [kg/kmol]	114,04 [kg/kmol]
GWP	1430	4

Wedle założeń można uznać że czynnik HFO1234yf posiada przewagę zalet. Aby oszacować parametry: wydajność chłodniczą oraz EER (EER, z ang. energy efficiency rating). Pracę obiegu

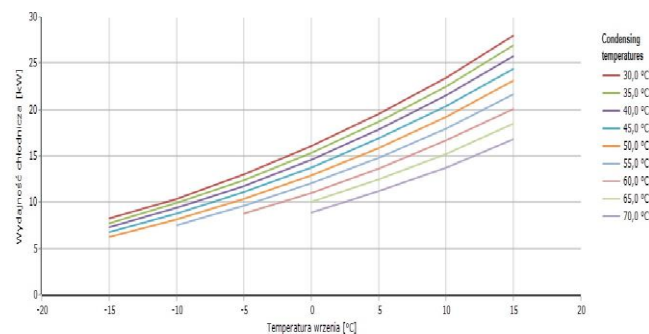
chłodniczego zasymulowano w programach: Coolpack Refrigeration Utilities Version 2,84 [6] oraz danfoss coolselector 2 [7].

Cykle przemian czynników zostały zobrazowane na rys. 4. Charakterystyki czynników chłodniczych obrazują zależność  $p=f(i)$ , gdzie ciśnienia  $p$  [bar] w funkcji entalpii  $i$  [kJ/kg]. Charakterystyka czynnika w HFO1234ya oznaczona kolorem czerwonym została porównana z charakterystyką czynnika R134a [17] – kolor czarny w tych samych warunkach. Przybliżone cykle pracy w założonym powyżej zakresie temperatur układu chłodzenia z czynnikiem HFO1234yf oraz R134a przedstawiają lewobieżne obiegi Lindego. Obiegi te przedstawiają wszystkie procesy termodynamiczne, przez które przechodzi czynnik chłodniczy przy założonych parametrach. Pojedynczy cykl ten podzielony jest na cztery fazy: 1-2 parowanie czynnika w parowniku, 2-3 sprężanie, 3-4 skraplanie, 4-1 dławienie. Wektory cyklu wrysowane są w charakterystyki czynników chłodniczych. Czynnik chłodniczy, aby mógł spełnić założenia temperaturowe jego ciśnienie musi być zmienione od 1,6 bara w parowniku, a do 7,7 bara w skraplaczu.



Rys. 4. Obiegi porównawcze czynników HFO1234yf i R134a [6]

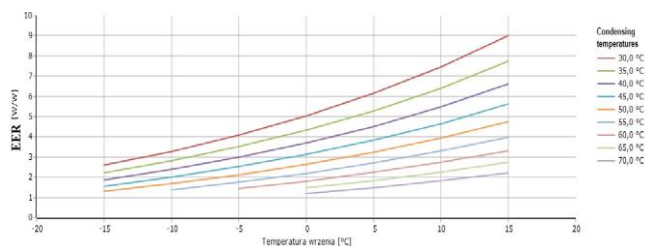
Zasymulowany zakres pracy czynnika chłodniczego temperaturowo – ciśnieniowy powinien zapewnić odpowiednią pracę ładowania zasobnika chłodu w elektrycznym autobusie miejskim w warunkach danych warunkach. Takie zakresy Ciśnień są typowymi dla komercyjnych sprężarek pracujących w chłodnictwie mobilnym [3, 4, 13, 19].



Rys. 5. Wydajność chłodnicza w kW w funkcji temperatury wrzenia czynnika HFO1234yf [7]

Z symulacji wydajności chłodniczej w programie służącym do symulacji i obliczeń firmy danfoss coolselector 2 wynika, że układ chłodniczy jest w stanie pracować z założonymi temperaturami. Jednakże przy niskim współczynniku EER, nieznacznie większym od jedności. Warunki o których wspomniano określają maksimum ponieważ aby posługiwać się entalpią przejścia fazowego wystarczy temperatura poniżej 0°C. Wówczas współczynnik EER przekroczy wartość 2. Podczas symulacji dla rozpoznania kluczowych parametrów pracy w całym zakresie temperatur zadano temperaturę wrzenia wynoszącą -15°C, temperaturę kondensacji 60°C oraz wydajność chłodniczą na poziomie 10 kW. Rysunek 5 wygenerowany w programie przedstawia wydajność chłodniczą układu przy różnych, zadanych temperaturach wrzenia czynnika.

Wykreślono również na rysunku 6. w programie danfoss coolselector 2 „Współczynnik wydajności chłodniczej EER (EER, z ang. energy efficiency rating) w funkcji temperatury wrzenia czynnika chłodniczego.”



Rys. 6. Wydajność chłodniczą EER w funkcji temperatury wrzenia czynnika HFO1234yf [7]

## 5. Wnioski

Problematyka doboru właściwego czynnika chłodniczego jest tematem o znacznej złożoności. Współcześnie jest to proces wielokryterialny, będący kompromisem między wydajnością – dobrymi parametrami termodynamicznymi a wpływem na środowisko. Unormowanie prawne z jednej strony stawiają ograniczenia chłodziarkom i właściwym dla nich czynnikom a z drugiej determinują kierunek rozwoju. Możliwości doboru czynnika chłodniczego są ograniczone ponieważ należy uznać zastosowania czynników chlorowych za niedopuszczalne. Zatem czynniki niespełniające norm europejskich nie mogą być rozważane.

Czynniki naturalne takie jak butan i propylen mogłyby funkcjonować w układach klimatyzacji autobusu miejskiego gdyby ich użyte masy były niewielkie. Należało by stwierdzić, że występująca w chłodziarce ilość tego czynnika nie zagraża pasażerom a zjawisko wybuchu lub zapłonu jest mało prawdopodobne. W przedmiocie rozważań wyselekcjonowano czynniki HFO1234yf jako posiadający największy potencjał zastosowania. Dokonując symulacji, jako ziębniak porównawczy został użyty popularny czynnik R134a. Symulacja dowodzi, że praca obiegu chłodniczego z obydwojema czynnikami odbywa się w przy podobnych parametrach temperatury. Czynniki posiadają zbliżone ciśnienia kondensacji natomiast ciśnienie parowania jest nieznacznie większe w przypadku R134. Na niekorzyść wspomnianego czynnika przemawia konieczność przetłaczania większego strumienia masy czynnika R1234yf w porównaniu do czynnika R134 a aż o 32%. Z otrzymanych w programie charakterystyk można wnioskować, że współczynnik wydajności chłodniczej maleje znacząco wraz z obniżaniem temperatury wrzenia czynnika. Wykazano w symulacji, że przy temperaturze wrzenia około  $-15^{\circ}\text{C}$  można uzyskać wydajność chłodniczą na poziomie około 8 kWh energii termicznej i współczynnika wydajności chłodniczej  $\text{EER}=2,5$ . Pomimo problemów z palnością czynnik ten jest niewybuchowy i posiada duży potencjał aplikacyjny do zastosowania w instalacji z zasobnikiem energii termicznej w elektrycznym autobusie miejskim. Energia zgromadzona w zasobniku energii termicznej może zostać również wykorzystywana do utrzymywania odpowiedniej temperatury pracy baterii napędowej elektrycznego autobusu miejskiego. Autobus wyposażony w zasobnik chłodu z nowoczesnym czynnikiem chłodniczym może zyskać wiele korzystnych cech użytkowych. Zasobnik chłodu może spowodować obniżenie energochłonności elektrycznej pojazdu, poprawić charakterystyki dynamiczne, zwiększyć zasięg autobusu

elektrycznego. Poprzez odciążenie występującej liczby ogniw chemicznych w układzie zasilania zwiększy się ich żywotność. Czynniki HFO1234yf nie wpłynęły znacząco na korzyści ekonomiczne wynikające z eksploatacji. Jednak wykazuje w przeciwieństwie do R134a kilkuletnią perspektywę wykorzystania w pojazdach komunikacji miejskiej, przy czym można uznać go za najbardziej konkurencyjny z ziębniaków komercyjnych dla rozważanego zastosowania.

## Literatura

- [1] Andrzejczyk R.: Alternatywy do R134a czynniki proponowane jako płyny robocze w klimatyzacji samochodowej i innych instalacjach chłodniczych o małej wydajności, część 1. Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, Wydawnictwo Masta, 5/2012.
- [2] Andrzejczyk R.: Alternatywy do R134a czynniki proponowane jako płyny robocze w klimatyzacji samochodowej i innych instalacjach chłodniczych o małej wydajności, część 2. Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, Wydawnictwo Masta, 6–7/2012.
- [3] Bohdal T., Charun H., Czapp M.: Urządzenia Chłodnicze Sprężarkowe Parowe, podstawy teoretyczne i obliczenia. WNT, Warszawa 2003.
- [4] Bonaca Z., Butrymowicz D., Dambek D., Depta A., Targański W.: Poradnik Czynniki chłodnicze i Nośniki Ciepła Własności Ciepłne, Chemiczne i Eksploatacyjne. IPPU Masta 1998.
- [5] Calmac. IceBank energy storage benefits. <http://www.calmac.com/icebank-energy-storage-benefits> [01.05.2016].
- [6] Coolpack Refrigeration Utilities Version 2,84, The Company IPU, Danmark <http://www.en.ipu.dk/>, [1.03.2016].
- [7] Coolselector2, The company Danfoss, Denmark <http://www.refrigerationandairconditioning.danfoss.com>, [1.03.2016].
- [8] Czerwiński A.: Akumulatory, baterie, ogniwa. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005.
- [9] Dowkontt J.: Teoria silników cieplnych. PWN, Warszawa 1962.
- [10] Gutkowski K. M., Butrymowicz D.: Chłodnictwo i klimatyzacja, WNT, Warszawa 2003.
- [11] Kopeć P.: Influence of refrigerant r1234yf as a substitute for r134a on a perfect refrigeration cycle and exchanger efficiency. Mechanika 1-M/2015.
- [12] Oró E., Gracia A., Castell A., Farid M. M., Cabeza L. F.: Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal Energy storage applications. Applied Energy 99/2012, 513–533.
- [13] Osmólski J.: Analiza wykorzystania nowych czynników chłodniczych o niskim współczynniku ocieplania globalnego. Politechnika Warszawska. Zakład Chłodnictwa i Energetyki Budynku.
- [14] Pojawa B.: Termodynamika techniczna. Wydawnictwo Akademickie AMW, Gdynia 2015.
- [15] Ruciński A., Rusowicz A., Grzebielec A.: Czynniki chłodnicze w transporcie samochodowym – aspekty prawne i techniczne. Logistyka 5/2014, 1303–1309.
- [16] Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D.: Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. ELSEVIER.
- [17] SOLKANE, The Company SOLVAY, Danmark [www.solvaychemicals.com](http://www.solvaychemicals.com), [1.03.2016].
- [18] Wesolowski A.: Kontrowersje związane z R1234yf jako czynnikiem chłodniczym. Chłodnictwo & Klimatyzacja, 10(146)/2010.
- [19] Zakrzewski B.: Dobór urządzenia chłodniczego, ZUT w Szczecinie Wydział Techniki Morskiej i Transportu Chłodniczego, [www.kkitch.zut.edu.pl/fileadmin/foto/zd/Wyklad\\_2a.pdf](http://www.kkitch.zut.edu.pl/fileadmin/foto/zd/Wyklad_2a.pdf) [1.03.2016].
- [20] Zieliński D., Jarzyna W., Kolano K.: Sposób i układ magazynowania ciepła i chłodu w pojazdach z napędem elektrycznym. Zgłoszenie Patentowe P.416882, 2016 r, Politechnika Lubelska.

Mgr inż. Michał Aftyka  
e-mail: m.aftyka@pollub.pl

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2011). Uczestnik studiów doktoranckich ww. Wydziału. Pracownik Zespołu Szkół Energetycznych w Lublinie jako nauczyciel przedmiotów zawodowych. Stosowane techniki badawcze to m.in. prototypowanie z wykorzystaniem środowiska dSpace, MATLAB/ Simulink oraz szeregu innych narzędzi informatyczno-sprzętowych.



otrzymano/received: 15.06.2016

przyjęto do druku/accepted: 14.08.2017