

MAREK PRYMON, JAN WRONA*

OBIEG STIRLINGA JAKO ALTERNATYWA W BUDOWIE URZĄDZEŃ CHŁODNICZYCH

STIRLING CYCLE AS AN ALTERNATIVE IN THE CONSTRUCTION OF REFRIGERATION DEVICES

Streszczenie

W artykule opisano podstawy teoretyczne działania urządzeń chłodniczych opartych na obiegu Stirlinga. Urządzenia tego typu mogą być alternatywą do stosowanych obecnie powszechnie chłodziarek realizujących obieg Linde. Przedstawiono zastosowanie analizy Schmidta wykorzystywanej w celu wstępnego wymiarowania tego typu urządzeń. Podano podstawowe zależności oraz opisano algorytm modelowania obiegu termodynamicznego Stirlinga. Analizę termodynamiczną obiegu chłodniczego Stirlinga uzyskaną z analizy Schmidta, gdzie cylindry traktowane są jako przestrzenie izotermiczne, porównano z wynikami otrzymanymi dla tego samego urządzenia przy założeniu, że cylindry stanowią przestrzenie adiabatyczne

Słowa kluczowe: obieg Stirlinga, urządzenia chłodnicze, chłodziarka Stirlinga, modelowanie obiegu chłodniczego

Abstract

The paper presents the theoretical basis of refrigeration equipment based on the Stirling cycle. Devices of this type may be an alternative to the now commonly used in refrigerating realizing circulation of Linde. The authors presents of analysis of Schmidt, which was used for the initial sizing of refrigerator devices. Dependencies and provides basic modeling algorithm described Stirling thermodynamic cycle. Thermodynamic analysis of the Stirling refrigeration cycle obtained from the analysis of Schmidt, where the cylinders are treated as isothermal spaces compared with the results obtained for the same device, assuming that the cylinders are spaces adiabatic

Keywords: circulation Stirling, refrigerator, Stirling cooler, the refrigerant circuit modeling

* Dr inż. Marek Prymon, dr inż. Jan Wrona, Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Klasycznym rozwiązaniem stosowanym we współczesnym chłodnictwie są urządzenia działające wg obiegu parowego Lindego. W systemach tego typu czynnik chłodniczy odparowuje w przeponowym wymienniku ciepła (parowniku) kosztem energii pobranej od środowiska. Następnie czynnik jest przegrzewany i zasysany przez sprężarkę. Na skutek sprężenia wzrasta ciśnienie oraz temperatura gazu, który przepływa do kolejnego wymiennika ciepła (skraplacza). W skraplaczu czynnik, oddając ciepło, ulega kondensacji. Ciepło kondensacji zostaje odprowadzone w wymienniku ciepła, a ciekły czynnik przepływa przez element rozprężny ponownie do parownika, gdzie odparowuje, pobierając z otoczenia ciepło.

W przeszłości większość urządzeń działających wg opisanego powyżej procesu wykorzystywało jako czynnik roboczy CCl₂F₂ (zwany freonem R12) oraz inne fluoropochodne metanu i etanu. Związki te po przedostaniu się do stratosfery rozpadały się pod wpływem promieniowania ultrafioletowego na węgiel, fluor i chlor będący katalizatorem rozpadu ozonu w cząsteczkę dwuatomową tlenu.

W 1987 roku w Montrealu podpisano międzynarodowe porozumienie w sprawie przeciwdziałania dziurze ozonowej. Od tego czasu związki zubożające warstwę ozonową oraz przyczyniające się do globalnego ocieplenia są sukcesywnie wycofywane z produkcji i użycia. Dodatkowo nowe czynniki chłodnicze często pociągają za sobą zmiany w konstrukcji samych urządzeń chłodniczych.

Wprowadzone nowe czynniki, takie jak R134a, miały zastąpić dotychczas stosowane substancje jedynie czasowo. Ze względu na zubożenie warstwy ozonowej oraz postępujące globalne ocieplenie w ostatnich dwóch dekadach większość krajów rozwiniętych zdecydowała się na wycofanie związków HCFC oraz CFC [9]. Związki te są obecnie wycofywane z użycia a laboratoria nadal pracują nad nowymi czynnikiami chłodniczymi.

Kolejnym czynnikiem, którego wycofanie wiąże się z dużymi kosztami, jest R22 wykorzystywany obecnie w większości instalacji przemysłowych oraz w klimatyzacji.

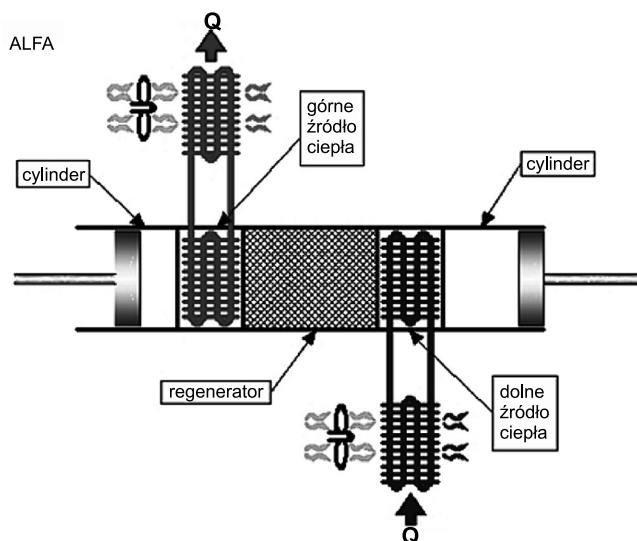
Alternatywą do stosowanych obecnie powszechnie obiegów parowych może być zastosowanie obiegu gazowego. Jednym z rozwiązań jest maszyna (ziębiarka) realizująca obieg Stirlinga, której schemat działania przedstawiono na rysunku poniżej (rys. 1).

Historycznie pierwszym pracującym wg obiegu Stirlinga urządzeniem był silnik ciepły skonstruowany przez szkockiego duchownego Roberta Stirlinga w 1816 roku [1, 2]. W czasie niemal 200-letniej historii urządzenia Stirlinga były stosowane jako silniki oraz ziębiarki, jednakże z powodu problemów technologicznych związanych z dostępnymi materiałami nie weszły one nigdy do seryjnej produkcji. W ostatnim okresie znaczny postęp techniczny w dziedzinie inżynierii materiałowej pozwolił na rozwiązanie większości problemów, na które napotykali w przeszłości konstruktorzy maszyn Stirlinga. W świetle opisanych powyżej problemów związanych z czynnikiami stosowanymi w obiegach parowych spowodowało to ponowny wzrost zainteresowania tymi urządzeniami.

Urządzenia realizujące obieg Stirlinga można podzielić pod względem konfiguracji na trzy grupy (alfa, beta, gamma) oraz dodatkowo jako kolejną konfigurację można rozpatrywać tzw. urządzenia temoakustyczne z tzw. falą biegnącą [1–4, 6, 17].

Największą efektywność osiągają urządzenia typu alfa. Wynika to z najmniejszej ilości procesów nieodwracalnych spośród wszystkich konfiguracji. Wadą tej konfiguracji jest ko-

nieczność uszczelnienia obu tłoków oraz mechanizmu przeniesienia napędu z przesunięciem fazowym około 90° . Z tego powodu większość produkowanych urządzeń chłodniczych pracujących w obiegu Stirlinga działa w konfiguracji beta. Przykładem może być chłodziarka opracowana przez firmę Global-Cooling. Urządzenie działające osiąga współczynnik efektywności ziębniczej (COP) równy 2 przy różnicy temperatur 35 [K]. Badania eksperymentalne ziębiarki Stirlinga w układzie cylindrów „V-90”, zostały przedstawione w [12]. Testy wykonano dla helu oraz argonu przy różnych ciśnieniach napełnienia. Model termodynamiczny takiego urządzenia z założeniem stanów ustalonych w zdyskretyzowanej przestrzeni 1D przedstawiono w pracy [13].



Rys. 1. Schemat działania urządzenia chłodniczego Stirlinga

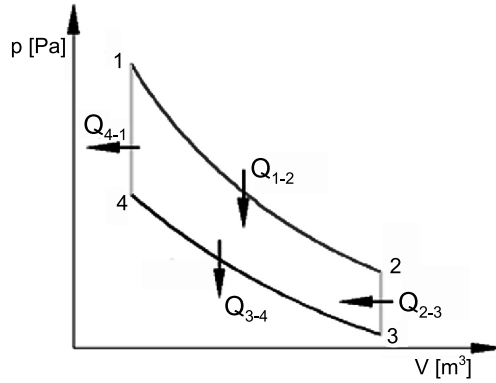
Fig. 1. Functional diagram of the Stirling refrigeration appliance

Inne spotykane obecnie rozwiązanie wykorzystujące obieg Stirlinga to urządzenia termoakustyczne z falą biegnącą. Urządzenia te stosowane są głównie w kriogenice ze względu na brak tłoków i innych elementów ruchomych zlokalizowanych w okolicy wymienników ciepła. Pozwoliło to uniknąć problemów materiałowych dzięki czemu np. chłodziarki typu *puls-tube* mogą osiągać temperatury rzędu 10 [K]. Urządzenia termoakustyczne [6, 14–16] mają zwykle niższą sprawność od odpowiadających im urządzeń Stirlinga, co wynika z dysypacji energii w gazie oraz przewodzenia ciepła (często stosuje się dodatkowe wymienniki ciepła przy „zimnym” końcu urządzenia w celu złagodzenia skutków tego procesu).

2. Obieg Stirlinga

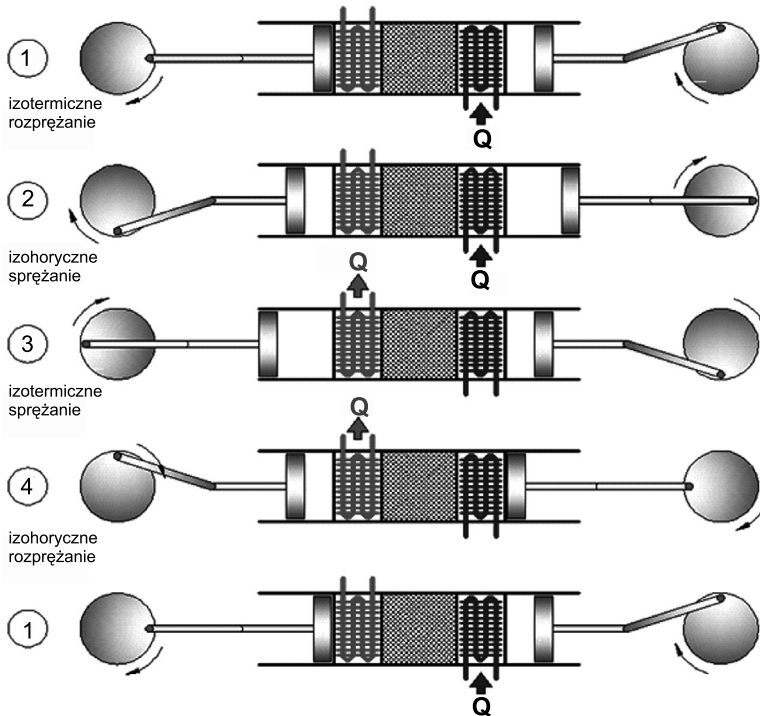
Maszyna Stirlinga to urządzenie realizujące obieg termodynamiczny określany teoretycznie jako zespół czterech przemian termodynamicznych (dwie izotermy i dwie izochory) (rys. 2). Teoretyczna efektywność obiegu jest równa efektywności obiegu Carnot i jest wyż-

sza od efektywności teoretycznej obiegu Lindego. W obiegu Stirlinga zamknięta w przestrzeni roboczej masa gazu przemieszcza się cyklicznie przy równoczesnych zmianach ciśnienia (rys. 3).



Rys. 2. Teoretyczny obieg termodynamiczny maszyny Stirlinga

Fig. 2. Theoretical thermodynamic cycle Stirling machines



Rys. 3. Cykle w urządzeniu realizującego obieg termodynamiczny Stirlinga

Fig. 3. Cycles in the device performing the Stirling thermodynamic cycle

Opisany powyżej proces realizowany jest w idealnej maszynie Stirlinga przy założeniu, że cylindry są jednocześnie wymiennikami ciepła, a regenerator jest urządzeniem odwracalnym. Bilans energetyczny takiego idealnego regeneratora podczas jednego cyklu wynosi zero, gdyż $Q_{2-3} = Q_{4-1}$. W rzeczywistości z powodu nieodwracalności rzeczywistych przemian energii nie można zbudować idealnej maszyny Stirlinga. Ta sama zasada dotyczy wszystkich obiegów termodynamicznych, przy czym silnik Stirlinga jest jedyną maszyną cieplną możliwą do zbudowania, która posiada sprawność teoretyczną obiegu Carnot.

W praktyce jednak niemożliwe jest zrealizowanie opisanego powyżej obiegu złożonego z czterech przemian, ponieważ gaz w poszczególnych chwilach pracy urządzenia pozostaje we wszystkich składowych objętościach przestrzeni roboczej (wymieniki ciepła, regenerator, cylindry). Nieodwracalność procesu oraz ciągła, równoczesna zmiana ciśnienia i objętości przestrzeni roboczej podczas cyklu pracy powoduje, że wspomniany model nie jest prawidłowy, nawet na potrzebę analizy teoretycznej przeprowadzanej w celu wstępnego wymiarowania urządzenia.

Poprawna analiza procesu wymaga dyskretyzacji przestrzeni oraz czasu. W modelowaniu zakłada się, że przemiany termodynamiczne zachodzą w poszczególnych sekcjach urządzenia traktowanych jako odrębne objętości kontrolne. Cykl pracy urządzenia (jeden pełny obrót wału) dzieli się na elementarne kąty $d\Phi$, w których stan gazu rozpatrywany jest jako ustalony. W efekcie otrzymuje się stany gazu w poszczególnych objętościach składowych przestrzeni roboczej w danych, dyskretnych chwilach cyklu Stirlinga [3–5, 7].

Przyjmując powyższe założenia, uzyskuje się układ równań opisujący pracę urządzenia, których rozwiązanie (z założeniem odpowiedniego kroku dyskretyzacji $d\Phi$) pozwala określić parametry pracy urządzenia w danych warunkach. Rozbudowując model o nieodwracalność poszczególnych procesów zachodzących w wymiennikach, wprowadzając opory przepływu gazu oraz straty ciepła przez regenerator i obudowę urządzenia, można przeprowadzić optymalizację urządzenia, wyznaczając przesunięcie fazowe cylindrów, zwymiarować regenerator oraz wymienniki ciepła.

3. Analiza Schmidta

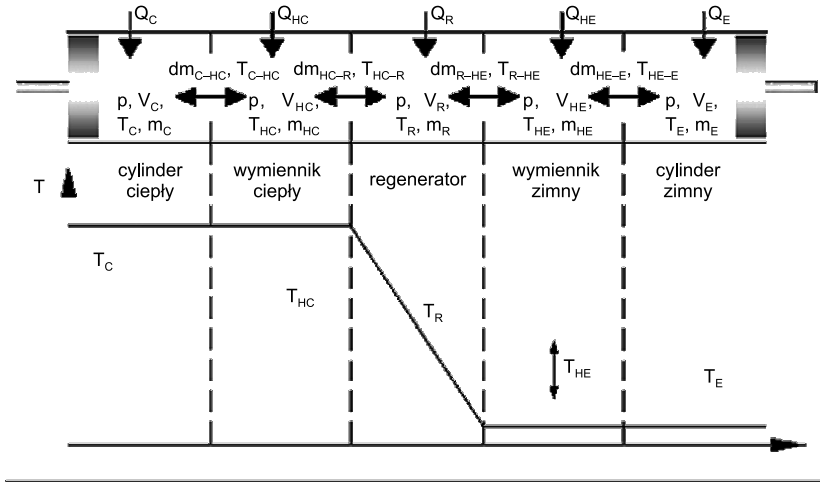
Analiza Schmidta jest podstawowym i najprostszym narzędziem do wstępnego wymiarowania urządzeń Stirlinga. Zakłada ona izotermiczne przemiany czynnika roboczego w cylindrach. Obliczenia wykonuje się, rozpatrując poszczególne sekcje maszyny Stirlinga jako odrębne objętości kontrolne wg poniższego schematu (rys. 4).

a) Bilans masy

$$M = m_C + m_{HC} + m_R + m_{HE} + m_E \quad (1)$$

gdzie:

- M – całkowita masa gazu w urządzeniu [kg],
- m_C – masa gazu w cylindrze ciepłym [kg],
- m_E – masa gazu w cylindrze zimnym [kg],
- m_{HC} – masa gazu w wymienniku ciepłym [kg],
- m_{HE} – masa gazu w wymienniku zimnym [kg],
- m_R – masa gazu w wymienniku regeneracyjnym [kg].



Rys. 4. Schemat dyskretyzacji przestrzeni maszyny Stirlinga w analizie Schmidta
 Fig. 4. Diagram of the space discretization in the analysis of Stirling machines Schmidt

b) Objętości gazu w poszczególnych sekcjach urządzenia

$$V_C = V_C(\Phi) - \text{cylinder ciepły [m}^3\text{]} \quad (2)$$

$$V_E = V_E(\Phi) - \text{cylinder zimny [m}^3\text{]} \quad (3)$$

$$V_{HC} = \text{const.} - \text{wymiennik ciepły [m}^3\text{]} \quad (4)$$

$$V_{HE} = \text{const.} - \text{wymiennik zimny [m}^3\text{]} \quad (5)$$

$$V_R = \text{const.} - \text{regenerator [m}^3\text{]} \quad (6)$$

gdzie:

Φ – chwilowa wartość kąta położenia wału.

c) Równanie stanu dla każdej objętości przyjmuje postać

$$m = pV/RT \quad (7)$$

d) Podstawiając odpowiednio wartości 2–6 do równania 7, otrzymujemy chwilowe wartości masy gazu w poszczególnych sekcjach urządzenia. Następnie podstawiając otrzymane masy do równania 1, otrzymujemy zależność na ciśnienie w przestrzeni roboczej w funkcji chwilowego kąta położenia wału.

$$p(\Phi) = \left(MR \left(\frac{V_C(\Phi)}{T_C} + \frac{V_{HXC}}{T_{HXC}} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_{HXE}}{T_{HXE}} + \frac{V_E(\Phi)}{T_E} \right)^{-1} \right) \quad (8)$$

e) Temperaturę średnią gazu w regeneratorsze obliczamy z zależności

$$T_R = \frac{T_{HC} - T_{HE}}{\ln \left(\frac{T_{HC}}{T_{HE}} \right)} \quad (9)$$

f) Pracę obiegu otrzymujemy, całkując poniższe zależności

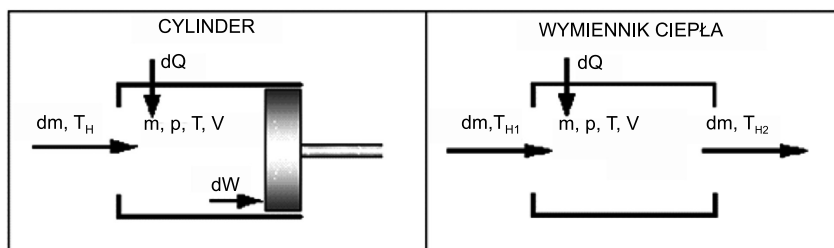
$$W_C = \oint p dV_C(\Phi), \quad W_E = \oint p dV_E(\Phi) \quad (10)$$

$$W = W_C + W_E \quad (11)$$

g) Pierwszą zasadę termodynamiki dla dowolnej objętości (rys. 5) można zapisać zależnościami 12, 13.

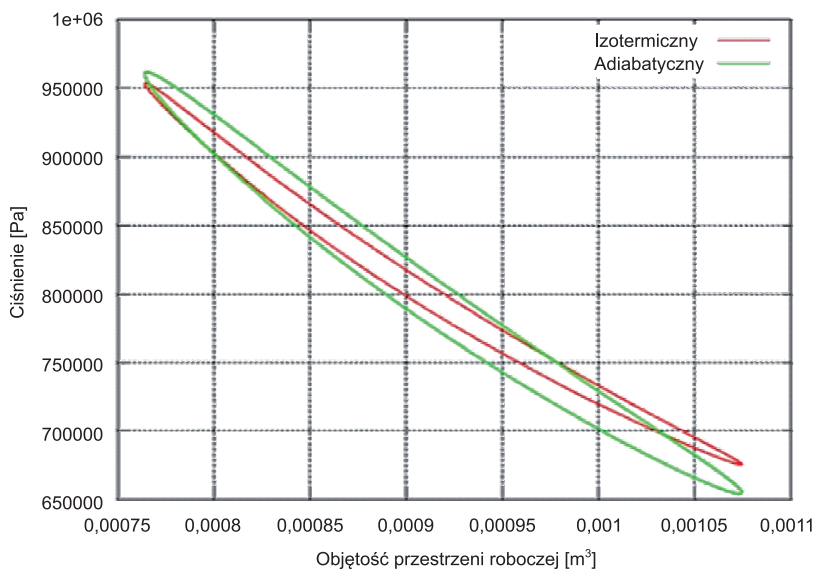
$$dQ + c_p T_H dm = dW + c_v d(mT) \quad (12)$$

$$dQ = dW - RT dm \quad (13)$$



Rys. 5. Schemat przepływu energii w cylindrze oraz wymienniku ciepła

Fig. 5. Schematic of energy flow in the cylinder and heat exchanger



Rys. 6. Wykres $p-v$ dla chłodziarki Stirlinga (przypadek izotermicznej oraz adiabatycznej przemiany gazu w cylindrach)

Fig. 6. Figure $p-v$ for Stirling coolers (isothermal and adiabatic case the transformation of gas in cylinders)

h) Całkując dla pełnego cyklu ($dm = 0$), otrzymujemy równości

$$dQ = dW \text{ – dla cylindra}$$

$$dQ = 0 \text{ – dla wymiennika ciepła}$$

Otrzymany wynik jest zgodny z założeniami doskonałego obiegu termodynamicznego. W przypadku Analizy Schmidta zakłada się, że całe ciepło jest doprowadzane i odprowadzane przez izotermiczne cylindry.

Na wykresie powyżej (rys. 6) kolorem czerwonym przedstawiono zależność ciśnienia od temperatury będącą wynikiem analizy Schmidta wykonanej dla chłodziarki Stirlinga. Kolorem zielonym oznaczono tę samą zależność dla przypadku, gdy przemiana gazu w cylindrach jest adiabatyczna, a energia jest odprowadzana oraz doprowadzana do obiegu przez wymienniki ciepła. Można zauważyć, że praca włożona do obiegu w przypadku wykresu obrazującego obieg z izotermiczną przemianą gazu w cylindrze jest mniejsza od pracy dla cylindrów, w których zachodziła przemiana adiabatyczna.

4. Wnioski

W artykule przedstawiono teoretyczne podstawy konieczne do wymiarowania i projektowania urządzeń realizujących obieg Stirlinga. Zastosowanie dyskretyzacji przestrzeni oraz czasu w modelowaniu przestrzeni roboczej pozwala dokładnie określić parametry pracy urządzenia w danych warunkach. Uwzględniając w modelu nieodwracalność procesów zachodzących w wymiennikach, wprowadzając opory przepływu gazu i straty ciepła przez regenerator i obudowę urządzenia, można przeprowadzić optymalizację urządzenia polegającą na wyznaczeniu przesunięcia fazowego cylindrów i na zwymiarowaniu regeneratora oraz wymienników ciepła.

Zwiększone zainteresowanie producentów oraz naukowców zastosowaniem technologii Stirlinga w świetle obowiązujących oraz planowanych regulacji prawnych dotyczących ochrony warstwy ozonowej i obniżenia poziomu emisji gazów cieplarnianych wskazuje, że urządzenia działające w obiegu Stirlinga mogą w przyszłości stanowić realną alternatywę do klasycznych technologii. Efektem ich wdrożenia do masowej produkcji byłoby obniżenie zużycia energii związanej z eksploatacją klimatyzatorów, chłodziarek domowych oraz pomp ciepła, gdyż urządzenia te charakteryzują się wyższym współczynnikiem efektywności (teoretyczny obieg Stirlinga posiada maksymalną z możliwych sprawność termodynamiczną).

Stosowany w chłodziarkach Stirlinga hel jako czynnik roboczy jest bezpieczny pod względem toksyczności i palności (posiada safety group A1) oraz charakteryzuje się ODP (potencjał niszczenia warstwy ozonowej) = 0,0. Znacznie mniejsza ilość części ruchomych w porównaniu do tradycyjnych ziębiarek oraz prostszy układ automatyki wpłynę na większą niezawodność i trwałość tych urządzeń.

Dopracowanie technologii oraz wprowadzenie jej do produkcji zmniejszyłoby koszty związane z chłodnictwem oraz rozwiązałyby problemy wymiany czynników ziębnicznych na nowe, przyjazne środowisku, których ceny przekraczają obecnie znacznie ceny ich poprzedników [18].

Literatura

- [1] Martini W.R., *Stirling Engine Design Manual*, University Press of the Pacific, 2004.
- [2] Organ A.J., *The Regenerator and the Stirling Engine*, Willey 1997.
- [3] Finkelstein T., Organ A.J., *Air Engine*, ASME Press 2001.
- [4] Thombarea D.G., Verma S.K., *Technological development in the Stirling cycle engines*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008.
- [5] Urieli I., Berchowitz D., *Stirling Cycle Engine Analysis*, ISBN 0-85274-435-8, Intl Public Service 1984
- [6] Swift G.W., *Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators*, Los Alamos National Laboratory, Acoustical Society of America 2002.
- [7] Chen N.C.J., Griffin F.P., *A Review of Stirling Engine Mathematical Models*, Oak Ridge National Laboratory.
- [8] Dziennik Ustaw z 2004 r. Nr 121 poz. 1263, Ustawa z dnia 20 kwietnia 2004 r. o substancjach zubożających warstwę ozonową.
- [9] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2037/2000 z 29 czerwca 2000 r. w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową.
- [10] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady nr 842/2006 z 17 maja 2006 r. w sprawie niektórych fluorowanych gazów cieplarnianych.
- [11] Ustawa o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji z dnia 17 lipca 2009. Dz.U. z 2009r. Nr 130, poz. 1070.
- [12] Le'an S., Yuanyang Z., Liansheng L., Pengcheng S., *Performance of a prototype Stirling domestic refrigerator*, Applied Thermal Engineering, 29, 2009, 210-215.
- [13] Ataera O.E., Karabulut H., *Thermodynamic analysis of the V-type Stirling-cycle refrigerator*, International Journal of Refrigeration 28, 2005, 183-189.
- [14] Tijani M.E.H., Spoelstra S., *Study of a coaxial thermoacoustic-Stirling cooler*, Cryogenics 48 (2008), 77-82.
- [15] Uedaa Y., Biwaa T., Yazakib T., Mizutania U., *Construction of a thermoacoustic Stirling cooler*, Physica B 329-333, 2003, 1600-1601.
- [16] Zhua S., Matsubara Y., *Numerical method of inertance tube pulse tube refrigerator*, Cryogenics 44, 2004, 649-660.
- [17] Żmudzki S., *Silniki Stirlinga*, WNT, Warszawa 1993.
- [18] PN-EN-378 Instalacje ziębnicze i pompy ciepła jako nowe kryterium oceny urządzeń chłodniczych.