

MAREK J. BERGANDER

## **Ejector Refrigeration Cycles**

### **Summary**

This publication describes a collaborative effort of various US and Polish organizations including a private company Magnetic Development, Inc. of Madison, CT, departments of the United States Government: Department of Energy and National Science Foundation, and Polish academia, including the Polish Academy of Sciences in Gdańsk and AGH University of Science and Technology in Krakow to investigate the possibility of improving the efficiency of HVAC systems by use of one and two-phase ejectors. It is anticipated that this technology, when fully developed will result in attractive, energy saving products that significantly improve the performance of commercial and residential chiller/air-conditioning systems, refrigeration plants, and heat pumps (geothermal and air-source).

Although the literature describing ejector applications in refrigeration dates back to the year of 1900 the ejector use was always considered as controversial at best, mainly because a lot of research has been conducted for many years with only theoretical results and without visible, commercial products. The research on the ejector application is consistent with present directions in the HVAC industry, which are: 1) improving the efficiency, 2) reducing the refrigerant charge and 3) reducing the footprint (size) of the refrigeration units. Author argues that an ejector, when considered as a “technology platform” is capable to significantly contribute to all three above goals and therefore, it will attract more attention and research funding in the future.

While numerous publications describe the ejectors and their use, none of them to our best knowledge had attempted to classify various types of thermodynamic cycles where ejectors can be applied. Consequently, the author proposes such classification, and he recognizes three distinctive “categories” of refrigeration cycles with ejectors. The Category 1 (ejector installed on compressor suction), receives less attention in this book because it is well known and the intellectual property belongs to others. Most detailed discussion and research results are presented for the case where the ejector is installed on compressor discharge (Category 2), as this is the main area of the author’s expertise and involvement. As a result of his research in this field, he possesses the

intellectual property in form of the U.S. Patent that controls this specific area of application. While those two categories of refrigeration cycle were designed to “help” a compressor reducing the work of pressuring the refrigerant, Category 3 Cycle eliminates the compressor whatsoever and uses low-quality heat, such as solar or waste heat as a main source of energy.

MAREK J. BERGANDER

## **Strumienicowe cykle chłodnicze**

### **Streszczenie**

Niniejsza publikacja opisuje wyniki szeroko zakrojonych prac naukowo-wdrożeniowych, przeprowadzonych pod kierownictwem autora przez różne ośrodki badawcze w USA i w Polsce. Głównym wykonawcą tych badań była amerykańska firma Magnetic Development, Inc. należąca do autora, a fundusze pochodziły w większości od departamentów rządu USA (Ministerstwo Energii i Ministerstwo Nauki). Polskie ośrodki biorące udział jako podwykonawca to Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku i Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie. Tematem opisanych badań była możliwość polepszenia sprawności urządzeń chłodniczych przez zastosowanie strumienic jedno- i dwufazowych. Autor ma nadzieję, że po wdrożeniu do przemysłu opracowane technologie zaowocują atrakcyjnymi i energooszczędnymi produktami, które znacząco obniżą pobór energii w urządzeniach chłodniczych, klimatyzacyjnych i pompach ciepła.

Chociaż zastosowanie strumienic w systemach chłodniczych było opisywane w literaturze od roku 1900, to urządzenia te były zawsze uważane za kontrowersyjne, głównie dlatego, że liczne badania naukowe nie przynosiły do tej pory wymiernych korzyści w postaci produktów komercyjnych. Obecnie badania są jednak kontynuowane, ponieważ technologia strumienicowa wydaje się obiecująca i zgodna z kierunkami rozwoju urządzeń chłodniczych, umożliwiając: 1) polepszenie ich sprawności, 2) zmniejszenie ilości czynnika chłodniczego oraz 3) zmniejszenie gabarytów całego urządzenia. Autor jest przekonany, że strumienica jako „platforma technologiczna” jest w stanie przyczynić się do osiągnięcia, a co najmniej przybliżenia wszystkich powyższych celów, i dlatego uważa, że prowadzenie dalszych badań jest uzasadnione.

Choć istnieje już obszerna baza literaturowa dotycząca strumienic i ich zastosowania, to do tej pory jednak nikt nie pokusił się o sklasyfikowanie różnych typów chłodniczych cykli termodynamicznych, w których urządzenie to może być praktycznie zastosowane. Wydaje się więc, że ważną zasługą autora jest podjęcie próby takiej klasyfikacji, która znacząco ułatwia zrozumienie często skomplikowanych systemów i cykli. Publikacja klasyfikuje strumienicowe cykle chłodnicze na trzy podstawowe kategorie. Kategoria 1 – strumienica zainstalowana na wlocie (ssaniu) kompresora – została potraktowana najbardziej pobieżnie, głównie dlatego, że jest ona dobrze znana

i opisana, a prawa własności intelektualnej należą już do innych wynalazców i firm. Najwięcej uwagi poświęcono kategorii 2 – strumienica zainstalowana na wylocie sprężarki. Jest to główna dziedzina badań autora, który jest wynalazcą tego cyklu i posiada prawa do tego rozwiązania w postaci patentu USA. O ile dwie powyższe kategorie charakteryzują się tym, że strumienica niejako wspomaga sprężarkę, zmniejszając jej pracę, a więc polepszając efektywność całego cyklu, to kategoria 3 całkowicie eliminuje sprężarkę z cyklu chłodniczego, a źródłem energii jest w tym przypadku ciepło niskotemperaturowe, np. odpadowe albo słoneczne.

Główną intencją autora było przybliżenie czytelnikowi strumienicowych cykli chłodniczych oraz uporządkowanie informacji zawartych w literaturze przedmiotu. Przytaczając teorie i przykłady rozwiązań praktycznych, autor ma jednocześnie nadzieję, że publikacja ta będzie inspiracją dla innych centrów naukowo-badawczych do podjęcia i kontynuacji prac naukowych i wdrożeniowych.

## Acknowledgements

The author acknowledges that the majority of research work described here was financed by various Departments of the United States Government. Specifically: research described in Chapters 4 and 5 was performed under the Invention and Innovation grants from U.S. Department of Energy, Category 1 grant Award Number DE-FG36-04GO14327 and Category 2 grant Award Number DE-FG36-06GO16049; research described in Chapter 6 was financed by National Science Foundation under Phase I STTR program, Award Number 0610613 and under Phase II and IIB STTR program, Award Number 0822525. Finally Chapter 7 was based on research financed by U.S. Department of Energy under Phase I SBIR program, Award Number DE-SC0003484.

I express my gratitude to the Dean of the Faculty of Mechanical Engineering and Robotics AGH, Professor Janusz Kowal for bringing the idea of writing this book, motivating me and providing support throughout the entire process of writing, reviewing and publishing. This book would never be completed without his constant reminders in the office, in hallways and even during casual encounters.

I acknowledge the great effort of Prof. Dariusz Butrymowicz from the Polish Academy of Sciences in Gdańsk and his entire team, including Dr. Jarosław Karwacki, Dr. Kamil Śmierciew and others. His team cooperated with me since 2008 as a subcontractor, performing numerous projects as a part of my research, which I was conducting under funding from the United States Government. They developed a theoretical and experimental base for various designs of ejector refrigeration cycles. Consequently, their reports to my company served as a base to prepare Chapters 3, 6 and 7. Prof. Butrymowicz was always available for discussions and visits and I thank him for all his scientific contributions as well as his personal friendship.

I am grateful to Professor David Schmidt from the University of Massachusetts at Amherst and his graduate students, Michael Colarossi and Thomas Furlong. Prof. Schmidt, while acting as my co-Principal Investigator on NSF project, has prepared a multidimensional CFD model for a condensing ejector, described in Paragraph 5.2. He also directed a detailed state-of-an-art study on ejectors and their applications, which I used to prepare Chapter 1.

Many thanks to Dr. Ben Schrag, the Project Manager from National Science Foundation for his continuous interest and valuable comments and suggestions throughout the entire research.

I express my appreciation to AGH Professors: Józef Salwiński, Andrzej Tytko and Stanisław Wolny for their motivation, support and friendship.

I would like to thank the reviewer, Dr. Bruce Maxfield, a Visiting Professor at the Indian Institute of Technology and formerly of Cornell University for many hours of constructive discussions on the phone and in person, which helped me to clarify various concepts of ejector cycles.

I appreciate the effort of Dr. Jerzy Wojciechowski and two graduate students from AGH University of Science and Technology, Mr. Mateusz Szklarz and Mr. Grzegorz Cagara for their constructive assistance in conducting this research, and help in preparing reports and papers.

The effort of Mr. Zygmunt Kamieński of Elektro-Rozruch to build my first laboratory stand and to teach me many valuable lessons on practical, hands-on engineering is very much recognized and appreciated.

The last but not least, I wanted to recognize the Technical Editor, Ms. Joanna Ciagała, who took great effort to proofread this manuscript multiple times, “hunting” for any errors and irregularities. Let me also acknowledge the entire team at Wydawnictwa AGH and thank them for making the entire process of publishing this book pleasant and memorable.

## **Disclaimer**

This publication was prepared based partially on the work sponsored by agencies of the United States Government, specifically U.S. Department of Energy and National Science Foundation. Neither the United States Government nor any agency thereof, nor any of their employees, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. Reference herein to any specific commercial product, process, or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States Government or any agency thereof. The views and opinions of authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States Government or any agency thereof.

Marek Bergander  
August 2011