

FRI-9.2-1-THPE-02

THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF NON-ELECTRICALLY DRIVEN REFRIGERATION MACHINE ¹¹

Assoc. Prof. Plamen Mushakov, PhD

Department of Heat, Hydraulics and Environmental Engineering
 “Angel Kanchev” University of Ruse
 Phone: 082-888 304
 E-mail: pgm@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Jivko Kolev, PhD

Department of Heat, Hydraulics and Environmental Engineering
 “Angel Kanchev” University of Ruse
 Phone: 082-888 304
 E-mail: zkolev@uni-ruse.bg

Asist. Prof. Pencho Zlatev, PhD

Department of Heat, Hydraulics and Environmental Engineering
 “Angel Kanchev” University of Ruse
 Phone: 082-888 333
 E-mail: pzlatev@uni-ruse.bg

***Abstract:** This work shows some research in the field of thermal refrigeration machines on the possibility of using waste heat from various industrial productions. The utilization of waste heat and secondary energy resources from power plants and technological processes in industrial enterprises with different temperature levels is also one of the main conditions for saving energy carriers. For refrigeration equipment, as one of the most energy-intensive sectors of the economy for any country, the prospect is the improvement of refrigeration machines, with the expanded possibility of using any type of heat, combined with the creation of new solutions for circuit cycles, contributing to reducing their energy dependence.*

A comparative exergy analysis of the different types was made and a methodology was proposed for determining the degree of thermodynamic perfection necessary for determining the energy efficiency of the installations.

***Keywords:** exergy efficiency, exergy analysis, degree of thermodynamic perfection water*

ВЪВЕДЕНИЕ

Поради опасенията за околната среда, породени от конвенционалните хладилни системи, съществува значително търсене на екологични алтернативни технологии в хладилните инсталации. Тези технологии обхващат заместващи работни течности, които не вредят на озоновия слой и не допринасят за затоплянето. Освен това нарастващите цени, произтичащи от повишеното търсене на енергия, подчертават необходимостта от подобряване на енергийните доставки чрез проучване на нови енергийни източници или чрез запазване на съществуващите ресурси чрез намаляване на темповете на потребление на енергия. Изследванията в областта на използването на отпадна топлина и възобновяеми източници са довели до появата на нови методи за охлаждане. През последните десетилетия търсенето на охладителни, хладилни и климатични системи се ускори, за да отговори на разнообразните инженерни изисквания и нуждите от комфорт. В отговор на това възобновяемите енергии, като например промишлена отпадна топлина, вятърна и слънчева енергия, набират популярност като устойчиви алтернативи за захранване на хладилни системи. Утилизацията на отпадъчна топлина и вторични енергийни ресурси от електроцентрали и технологични процеси в промишлени предприятия с различни температурни нива е също едно от основните условия за спестяване на енергоносители. За хладилната техника, като един от най-енергоемкия отрасъл на икономиката за всяка страна, перспективата е усъвършенстването на

¹¹ Докладът е представен на Научната сесия на Секция „Топлотехника, хидро- и пневмотехника“ на 24 Октомври 2025 г. с оригинално заглавие на български език: ТЕРМОДИНАМИЧНА ЕФЕКТИВНОСТ НА ХЛАДИЛНИ МАШИНИ С НЕЕЛЕКТРИЧЕСКО ЗАДВИЖВАНЕ.

хладилните машини, с разширената възможност за използване на всякакъв вид топлина, в съчетание със създаването на нови решения за схемни цикли, допринасящо за намаляване на енергийна им зависимост.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Голяма част от промишлените предприятия в химическата, металургичната и други отрасли, разполагат с големи количества отпадъчна топлина, степента на използването им е крайно незначителна, особено през летния период.

За използване на тези енергийни ресурси в настояще време най-голямо разпространение са получили абсорбционните и пароежекторни хладилни машини. Освен това, в някои случаи намират приложение парокompресорни и въздушни турбохладилни машини с паротурбинно задвижване. Тези хладилни машини и някои други (например, работещи по схема Чистяков – Плотников) се наричат топло използващи. Същевременно такава класация не всякога съответства на действителността (с изключение на абсорбционните хладилни машини с термически неравновесен източник на енергия).

Правилно би било да обединим всички тези машини с едни универсален термин, който отразява всички тези разнообразни енергоносители, използвани като източник на енергия (машини с неелектрическо задвижване - ексергоизползващи).

Избирането на един или друг тип хладилна машина с неелектрическо задвижване трябва да се основава на технико-икономически анализ с отчитане на енергийните особености на технологиите захранвани със студ. Енергийните параметри на машината в общия технико – икономически баланс заемат съществено относителен дял, затова е важно правилно да се подберат критериите за оценка на термодинамичната, а следователно и енергийната ефективност на хладилната машина. Той трябва да е универсален, отчитащ не само количественото съотношение между различните енергийни потоци, но и неговата качествена страна, т. е. ограничение по превръщането на енергията според втория принцип на термодинамиката. Такъв критерий е степента на термодинамично съвършенство, която може да се определи с произволен метод на сравняване на циклите или метода на потенциалите.

Оценка на термодинамичната ефективност на хладилни машини с неелектрическо задвижване с помощта на топлинни коефициенти на преобразуване не са универсални, тъй като те представляват количествени характеристики и не отчитат топлините потенциали на получения студ, а също така и качеството на задвижването.

Степента на термодинамично съвършенство η_c за топлоизползващи хладилни машини на основата на сравняване на циклите, може да определим по пътя на сравнение коефициентите на преобразуване на теоретичния φ_t , обратимия φ_{ob} и действителния φ_d [2]:

$$\eta_c = \frac{\varphi_t}{\varphi_{ob}} \frac{\varphi_d}{\varphi_t} = \frac{\varphi_d}{\varphi_{ob}} \quad (1)$$

Същевременно такъв подход може да доведе към завишение на степента на термодинамично съвършенство на хладилната машина с неелектрическо задвижване, в работата [3] е завишена с 30 – 60% спрямо реалните стойности. Полученият резултат е обусловен от това, че методите на сравняване на правия и обратния цикъл на топлоизползващи хладилни машини, предложен от Л. М. Розенфелд и получил достатъчно широко разпространение при анализ на схеми на абсорбционни машини, не винаги може да е коректно използван при анализ на пароежекторни машини. При тези машини специалният прав цикъл, протичащ в температурен интервал, съответстващ на параметрите на енергоносителя, в някои случаи се оказва икономически нецелесъобразен.

Съвместно производство на механична енергия и охлаждане в една машина отдавна е признато като ефективен начин за намаляване на потреблението на материални и природни ресурси.

Класификационната група на машините, използващи топлина, включва абсорбционни [1], ежекторни [2] и парокompресорни машини задвижвани от турбина, работещи със същото работно вещество като хладилната машина.

Компресорните машини са създадени последни в този клас и имат предимството - висока енергийна ефективност. Машините, работещи по цикъла на Чистяков - Плотников, са широко известни, разработени и намерили приложение в практиката [4]. Машините работят HFC и HCFC вещества (R12, R11, R22) при температури на топлинния източник с висок потенциал от 60 до 250 0C и работно налягане от 10 до 25 bar. Машината комбинира силов и хладилен контур с общ кондензатор и агрегат "турбина-компресор" [4, 5].

Степента на термодинамично съвършенство (ексергийният КПД η_e) може по този метод да се определи като отношение на изходящата ексергия E_{out} към входящата E_{in} .

$$\eta_C = \eta_E = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (2)$$

При използване метода на потенциалите е установено различие (..) между ексергическата ценност на енергоносителя, използван за задвижване и качеството на произведения студ.

В такъв случай, ексергийният КПД отчита ефективността на енергийното преобразуване (качествената страна) на преобразуване при охлаждане в произволна хладилна инсталация независимо от вида на външния енергоизточник, както и температурните интервали в хладилния цикъл.

В най-общ вид степента на термодинамично съвършенство на хладилна машина с неелектрическо задвижване може да се определи по формулата:

$$\eta_C = \frac{Q_0 \cdot \tau_x + Q_{h2} \cdot \tau_{h2} + D_{steam} \cdot e_{steam2}}{D_{steam} \cdot e_{steam1} + Q_{h1} \cdot \tau_{h1} + N_i} \quad (3)$$

където Q_0 – студопроизводство на хладилната машина, W;

$\tau_x, \tau_{h1}, \tau_{h2}$ – ексергийни температурни функции и топлинни потоци {1};

Q_{h2} – топлопроизводство (в случая полезно използвана топлина, получена в хладилната инсталация), W;

D_{steam} – разход на пара (газ), използван в хладилната инсталация, kg/s;

e_{steam1}, e_{steam2} – ексергия на парата на входа и изхода на инсталацията;

Q_{h1} – топлина, подведена към хладилната инсталация (помпи, вентилатори и др.), W;

N_i – Мощност, необходима за спомагателните механизми, W.

В повечето случаи топлоносителя (вода) се загрява в кондензатора или абсорбера с около 4 – 6 0C, и ексергията му не може да се използва по технико-икономически причини. Затова ексергийната топлина, получена в хладилната инсталация, в такива случаи може да се пренебрегне ($Q_{h2} \cdot \tau_{h2} = 0$).

Основно за абсорбционни хладилни машини без полезно използваната топлина на кондензация и абсорбция уравнение (3) има вид:

$$\eta_C = \frac{Q_0 \cdot \tau_x}{Q_{h1} \cdot \tau_{h1} + N_i} \quad (4)$$

При анализ на пароежекторни хладилни машини уравнение (4) може да се преобразува с отчитане на някои емпирически зависимости. Установено е, че в тези машини, електроенергията използвана за задвижване на спомагателните механизми, е от порядъка 3 ÷ 6% от общата консумирана електроенергия.

Предвид това, че:

$$Q_0 = q_0 \cdot G_0 \quad (5)$$

където G_0 – масов дебит на работна пара, kg/s;

q_0 – специфично студопроизводство, kJ/kg.

И с отчитане на формула (3) получаваме следния израз:

$$\eta_c = \frac{q_0 \cdot \tau_X + a \cdot e_{steam_2}}{(1,03 \div 1,06) \cdot a \cdot e_{steam_1}} \quad (6)$$

където а – действителен разход на пара а = D_{steam}/G₀

За устойчива работа на ежекторите се препоръчва получените изчислителни стойности да се увеличат 5 ÷ 10%. След което уравнение (6) може да се представи във вида:

$$\eta_c = \frac{q_0 \cdot \left(\frac{T_m}{T_0} - 1\right) + (1,05 \div 1,1) \cdot a_i \cdot e_{steam_2}}{(1,08 \div 1,16) \cdot a_i \cdot e_{steam_1}} \quad (7)$$

където T_m, T₀ – средна температура на охлаждаемия обект и температура на кипене ;
a_i – изчислителен специфичен коефициент на разход на пара.

По приведената методика е определена степента на термодинамично съвършенство за различни видове хладилни машини с неелектрическо задвижване (таблица 1).

Таблица 1. Степен на термодинамично съвършенство за различни видове хладилни машини с неелектрическо задвижване

| Хладилни машини | Най-ниска температура на получения студ, °C | Източник на енергия | Степен на термодинамично съвършенство; % |
|--|---|--------------------------------------|--|
| Абсорбционни: - бромистолитиеви | 7 | Водна пара, p = 0,147 ÷ 0,166 МПа | 10 ÷ 16 |
| - водоамонячни | -25 | Водна пара, p = 0,45 МПа | 3,6 ÷ 6,5 |
| Пароежекторни: - водни | 9 ÷ 16 | Водна пара, p = 0,7 МПа | 6 ÷ 8 |
| - фреонови | 5 ÷ 7 | Водна пара, p = 0,5 МПа | 5 ÷ 7 |
| Фреонови с паротурбинно задвижване | 2 | p = 0,3 ÷ 0,8 МПа | 26 ÷ 30 |
| Работещи по схема на Чистяков - Плотников | -5 | Водна пара, t = 60 ÷ 100 °C | 28 ÷ 30 |
| Въздушни турбохладилни с паротурбинно задвижване | -25 ÷ -50 | Водна пара, p = 0,3 ÷ 0,8 МПа | 8 ÷ 18 |

От получените стойности в таблицата се вижда, че при близки стойности на температурата на охлаждаемия обект, най – малка степен на термодинамично съвършенство имат пароежекторните машини, а най–висока – парокompресорните с паротурбинно задвижване.

По-високи стойности на степента на термодинамично съвършенство на парокompресорните машини се обяснява с по-малкото влияние на необратимите процеси върху ефективността на енергийното преобразуване (трансформация), отколкото в абсорбционните и пароежекторни хладилни машини.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представената методика е универсална и може да се използва за определяне на енергийната ефективност (степен на термодинамично съвършенство), както и за сравнение на различни хладилни машини с неелектрическо задвижване, работещи при еднакви температурни нива.

REFERENCES

- Бродянский, В. М., В. Фратшер, К. Михалек Эксергетический метод и его приложение, Энергоиздат, М., 1988
- Abed, H., K. Atashkari, A. Niazmehr, A. Jamali Thermodynamic optimization of combined power and refrigeration cycle using binary organic working fluid *Int. J. Refrig.*, 36 (2013), pp. 2160-2168
- Dimov, P., Zh. Kolev Simulation study of the heat transfer intensity in the input zone of the ducts of two stage water to air heat exchanger, 61th Science Conference of Ruse University - SSS, Volume 61, Book 1.2, 2022г., Ruse, pp.31-36
- DUPONT J. L., The Role of Refrigeration in the Global Economy (2019), 38th Note on Refrigeration Technologies., IIF-IIR, 2019
- M. G. Gado, S. Ookawara, S. Nada, I.I. El-Sharkawy, Hybrid sorption-vapor compression cooling systems: A comprehensive overview, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 143 (2021) 110912, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110912>.
- Penev, Y, P. Zlatev, V. Bobilov. PERFORMANCE ASSESSMENT OF SORPTION REGENERATOR FOR DEHUMIDIFICATION IN AIR HANDLING UNIT Proceedings of Conference of University of Ruse, 2018г., Ruse, Bulgaria
- Raed Al-Rbaihat a , Hussein Alahmer b , Ali Alahmer a,c,* , Yousef Altork d , Ahmed Al-Manea e , K.Y.Eayal Awwad a Energy and exergy analysis of a subfreezing evaporator environment ammonia-water absorption refrigeration cycle: Machine learning and parametric, *International Journal of Refrigeration*, Volume 154, pp. 182-204, 2023
- X. She, L. Cong, B. Nie, G. Leng, H. Peng, Y. Chen, X. Zhang, T. Wen, H. Yang, Y. Luo, Energy-efficient and -economic technologies for air conditioning with vapor compression refrigeration: A comprehensive review, *Appl. Energy* 232 (2018) 157–186, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.067>.