

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.83>

УДК 621.574

Перспективи застосування компресорних тепловикористальних холодильних машин з CO₂ для енергоефективних систем

Гайдук Сергій Васильович¹⁾

Канд. техніч. наук, старший викладач каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1627-2986>; gayduck.sergei@gmail.com. Scopus Author ID: 57170822000

Вердиш Олександр Сергійович¹⁾

Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8822-7108>; 10253021@stud.op.edu.ua

Жевняк Єлизавета Юрійвна¹⁾

Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5051-5969>; 10253044@stud.op.edu.ua

Тернова Дар'я Олексіївна¹⁾

Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7465-0747>; 10253035@stud.op.edu.ua

¹⁾ Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто сучасні підходи до підвищення енергоефективності за допомогою тепловикористальних холодильних машин. Проведено детальний огляд основних типів таких машин – ежекторних, адсорбційних, абсорбційних та компресорних – із визначенням їхніх переваг, обмежень та типових сфер застосування. Особлива увага приділена компресорним тепловикористальним холодильним машинам, у яких інтегровано процеси перетворення теплоти у виробництво холоду. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати низькопотенційне та скидне тепло в складних енергетичних системах.

У роботі запропоновано нове схемне рішення компресорної тепловикористальної холодильної машини з використанням діоксиду вуглецю як робочої речовини. Виконано термодинамічний аналіз її еталонного циклу з оцінкою впливу тиску та температури у газовому нагрівачі на коефіцієнт перетворення енергії, що дозволило визначити оптимальні режими роботи. Результати дослідження показали, що підвищення тиску та температури у газовому нагрівачі значно покращує енергетичну ефективність машини та перевищує показники більшості відомих тепловикористальних холодильних машин.

Отримані дані підтверджують доцільність застосування запропонованої схеми для підвищення ефективності комплексних енергетичних систем і розширення можливостей утилізації низькопотенційного тепла. Таким чином, досліджене рішення є конкурентоспроможною альтернативою існуючим технологіям та може слугувати основою для розвитку енергоефективних і екологічно безпечних систем холодопостачання та тригенерації.

Ключові слова: тепловикористальні холодильні машини; компресорні системи; діоксид вуглецю; термодинамічний аналіз; коефіцієнт перетворення енергії; утилізація теплоти; енергетична ефективність; тригенерація; енергетичні системи; моделювання процесів; інноваційні технології; енергозбереження

1. ВСТУП

Одним із ключових напрямів сучасної енергетики є раціональне використання теплових ресурсів, зокрема низькопотенційної та вторинної теплоти. Це пов'язано з глобальними викликами енергозбереження та необхідністю зменшення впливу енергетики на довкілля. У цих умовах зростає інтерес до тепловикористальних холодильних машин (ТХМ), які здатні ефективно перетворювати скидне тепло у корисний холод чи інші види енергії.

ТХМ дозволяють вирішувати кілька важливих завдань: підвищувати ефективність комплексних енергетичних систем, здійснювати утилізацію низькопотенційного тепла та розширювати можливості інтеграції відновлюваних джерел енергії. Їх використання актуальне для промислових підприємств, транспортних систем та енергетичних установок, де утворюються значні обсяги скидної теплоти.

Сьогодні розроблено кілька основних типів ТХМ: парокомпресорні, ежекторні, сорбційні (адсорбційні та абсорбційні) та компресорні. Кожен тип має власні переваги та обмеження, що визначають сфери застосування.

Ежекторні ТХМ базуються на використанні потенціальної енергії робочої речовини для перенесення теплоти між температурними рівнями. Їхні головні переваги – простота конструкції, відсутність рухомих елементів, висока надійність і довговічність [1]. Такі системи можуть працювати з різними робочими тілами, проте їхній суттєвий недолік – низька термодинамічна ефективність через необоротні втрати в ежекторі [2]. Незважаючи на це, вони застосовуються там, де пріоритетними є екологічна безпека, автономність чи робота без електроприводу.

Сорбційні ТХМ займають особливе місце серед тепловикористальних установок. У них реалізуються термохімічні процеси стиску робочих сумішей, що компенсують виробництво ентропії при перенесенні теплоти [3]. В адсорбційних машинах застосовуються тверді сорбенти (CaCl_2 , силікагель, активоване вугілля) та холодоагенти (аміак, вода, метанол). Такі системи ефективні при низьких температурах (10–120 К) та демонструють високі значення коефіцієнта перетворення для сумішей «активоване вугілля – аміак» [4]. Їхнє застосування обмежене періодичністю процесу, тому вони підходять для малопотужних установок.

Абсорбційні машини базуються на використанні рідких поглиначів, найпоширеніші робочі пари – « $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ » та « $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ » [4]. Системи з бромідом літію використовуються у кондиціонуванні повітря, проте їх розвиток обмежений фізико-хімічними властивостями розчинів. Водночас водоаміачні системи відкривають перспективи створення багатоступеневих, каскадних і реверсивних схем [5].

Компресорні ТХМ поєднують тепловий двигун та холодильну установку, використовуючи низькокиплячі робочі тіла (R717 , R11 , R12 , R123). Вони здатні працювати в широкому діапазоні параметрів і відзначаються високою ефективністю. Основний елемент – агрегат «турбіна-компресор» у спільному корпусі, що забезпечує підвищення ефективності на 20–50 % у порівнянні з іншими типами машин [6]. Такі установки застосовувались як у великих системах кондиціонування транспорту, так і у малопотужних суднових установках.

Отже, кожен тип тепловикористальних холодильних машин має власні обмеження, пов'язані з робочими речовинами та конструкцією, проте всі вони відкривають перспективи підвищення енергоефективності та екологічної безпеки в сучасній енергетиці.

Основні труднощі при виборі робочої речовини полягають у необхідності забезпечення стабільності властивостей у широкому діапазоні температур циклу, інертності до конструкційних матеріалів, відсутності кристалізації та хімічної агресивності.

Міжнародні, регіональні та національні нормативні акти передбачають поступове виведення з експлуатації хлор- та фторвмісних холодоагентів із високим озоноруйнівним потенціалом (ODP) та значним впливом на глобальне потепління (GWP). На зміну їм приходять агенти нового покоління: фтороподібні метану, етану і пропану, вуглеводні, аміак та діоксид вуглецю [7]. Серед них саме CO_2 посідає провідне місце завдяки поєднанню унікальних властивостей [8,9].

Ключові переваги CO_2 як робочого тіла:

- висока об'ємна холодопродуктивність → компактність обладнання;
- низька критична температура → можливість роботи в надкритичній області;
- коефіцієнт тепловіддачі на 60–70 % вищий, ніж у традиційних агентів;
- низька вартість та добре вивчені термодинамічні властивості;
- хімічна інертність, сумісність з поліефірними маслами;
- $\text{ODP} = 0$, $\text{GWP} = 1$ → екологічна безпечність;
- негорючість;
- перевірених застосування у високотемпературних процесах, зокрема в ядерній енергетиці.

Результати досліджень підтверджують, що застосування CO_2 у компресорних системах дозволяє зменшити масогабаритні показники обладнання, підвищити вироблену енергію до 40 % та збільшити ефективність до 50 % у порівнянні з циклами на базі Ренкіна [9].

2. ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМНОГО РІШЕННЯ КОМПРЕСОРНОЇ ТЕПЛОВИКОРИСТАЛЬНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ НА CO₂

Враховуючи всі наведені переваги діоксиду вуглецю як робочої речовини, у 2012 році було розроблено нове схемне рішення компресорної тепловикористальної холодильної машини, в якій CO₂ застосовується як робоча речовина [10].

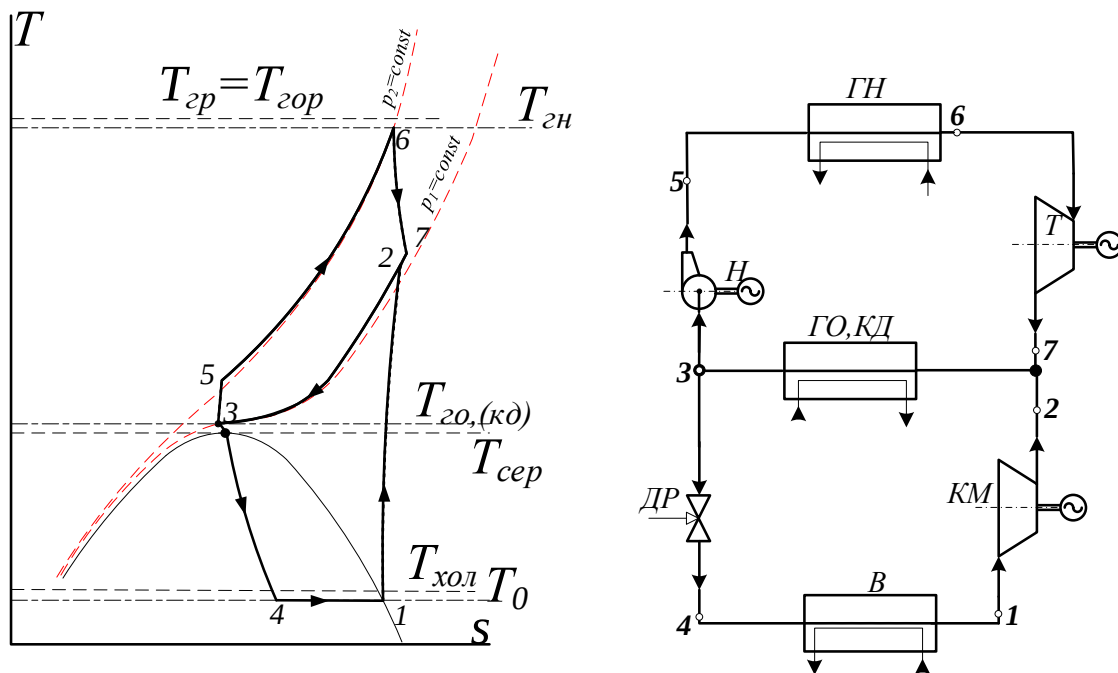


Рис. 1. Еталонний цикл та схема компресорної тепловикористальної холодильної машини для практичної реалізації

Цикл машини здійснюється таким чином. У газовому нагрівачі (ГН) відбувається нагрівання діоксиду вуглецю при високому тиску завдяки підведенню теплоти від гріючого джерела. Далі пара високого тиску розширюється у турбіні (Т) до середнього тиску з утворенням механічної роботи, яка використовується для приводу компресора (КМ) та насоса (Н).

Потік пари низького тиску з випарника (В) надходить у компресор, де стискається до середнього тиску. У результаті два потоки пари середнього тиску змішуються, після чого внаслідок відведення теплоти у навколишнє середовище (температура якого перевищує критичну температуру для R744) здійснюється охолодження у газовому охолоджувачі (ГО) або, у випадку нижчої за критичну температури середовища, – конденсація у конденсаторі (КД).

Після процесу охолодження чи конденсації робоча речовина розділяється на два потоки.

- Перший потік надходить у насос (Н), де стискається до високого тиску, після чого повертається у газовий нагрівач для повторення циклу.
- Другий потік проходить через дросельний вентиль (ДВ), де його тиск знижується, і далі надходить у випарник (В).

У випарнику відбувається процес отримання холоду завдяки теплообміну між діоксидом вуглецю та охолоджуванним об'єктом. Таким чином, схема забезпечує одночасну генерацію холоду, теплоти та можливої корисної роботи (у випадку перерозподілу споживачів холоду), що дозволяє віднести її до класу тригенераційних установок.

Для порівняння наведеного схемного рішення (рис. 1) з іншими типами тепловикористальних холодильних машин проведено термодинамічний аналіз, спрямований

на визначення коефіцієнта перетворення енергії (COP) при різних режимах роботи, що дозволило оцінити ефективність досліджуваної установки.

Аналіз проводився для вихідних параметрів: максимальна температура робочої речовини в газовому нагрівачі $t_{ГН} = 120...700^{\circ}\text{C}$; тиск робочої речовини в газовому нагрівачі $p_{ГН} = p_6 = 100...300 \text{ бар}$, в газовому охолоджувачі – $p_3 = 75 \text{ бар}$; мінімальна температура в газовому охолоджувачі $-t_3 = 30^{\circ}\text{C}$; температура кипіння $t_0 = 5^{\circ}\text{C}$; ККД турбіни $\eta_T = 0,85$, насоса $\eta_H = 0,9$ і компресора $\eta_{KM} = 0,8$; ККД електродвигуна $\eta_{ED} = 0,95$, електрогенератора $\eta_{EG} = 0,95$; Результати дослідження показані на рис. 2

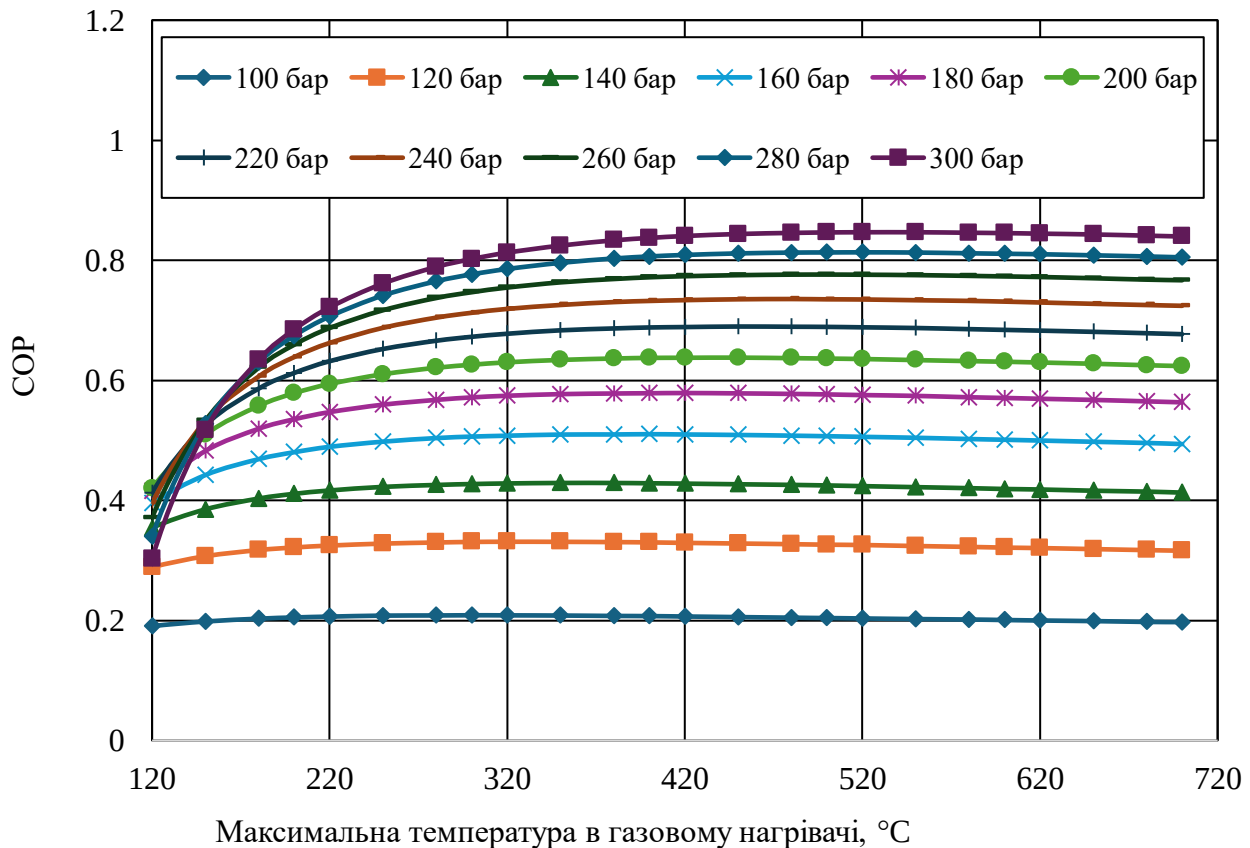


Рис. 2. Залежність коефіцієнта перетворення COP від тиску та максимальної температури в газовому нагрівачі

3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Еталонний цикл тепловикористальної компресорної холодильної машини з робочою речовиною R744 характеризується коефіцієнтом перетворення (COP) у межах 0,2–0,85. Найнижча енергетична ефективність спостерігається в усьому діапазоні досліджуваних температур при тиску в газовому нагрівачі 100 бар. Подібна тенденція зберігається й для тисків 120-140 бар, проте зі зростанням тиску ефективність машини підвищується.

При більш високих тисках відзначається суттєве зростання енергетичної ефективності зі збільшенням температури в газовому нагрівачі до 300 °C. Максимальні значення COP досягаються в діапазоні температур 320–550 °C залежно від робочого тиску.

Отримані результати значно перевищують показники більшості відомих тепловикористальних холодильних машин, що підтверджує доцільність застосування діоксиду вуглецю (R744) як робочої речовини та обґрунтовує перспективність упровадження запропонованої схеми в практику. Таким чином, досліджене схемне рішення може

розглядатися як конкурентоспроможна альтернатива сучасним технологіям та стати основою для розвитку енергоефективних і екологічно безпечних систем холодопостачання й тригенерації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Liu B., Guo X., Xi X., Sun J., Zhang B., Yang Z. “Thermodynamic analyses of ejector refrigeration cycle with zeotropic mixture”. *Energy*. 2023; 263 (Part D): 125989. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125989>.
2. Tashtoush B. M., Al-Nimr M. A., Khasawneh M. A. “A comprehensive review of ejector design, performance, and applications”. *Applied Energy*. 2019; 240: 138–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.185>
3. Morozuk T. V. “Water-ammonia thermotransformers (theory, analysis, synthesis, optimization)”. *Автореферат дисертації доктора технічних наук. Одеський державний політехнічний університет*. 2001.
4. Pons M., Meunier F., Cacciola G., Critoph R. E., Groll M., Puigjaner L., Spinner B., Ziegler F. “Thermodynamic based comparison of sorption systems for cooling and heat pumping”. *International Journal of Refrigeration*. 1999; 22 (1): 5–17. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(98\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(98)00048-6).
5. Berlitz T., Satzger P., Summerer F., Ziegler F., Alefeld G. “A contribution to the evaluation of the economic perspectives of absorption chillers: Contribution à l'évaluation des perspectives économiques des refroidisseurs à adsorption”. *International Journal of Refrigeration*. 1999; 22 (1): 67–76. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(98\)00040-1](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(98)00040-1).
6. Чистяков Ф., Плотников А. «Холодильний турбоагрегат із приводом від турбіни, що працює на холодильному агенті». *Холодильна техніка та технологія*. 1952; 3: 16–19.
7. Bivens D. B., Minor B. H. “Fluoroethers and other next generation fluids: Fluoroethers et autres fluides de la prochaine génération”. *International Journal of Refrigeration*. 1998; 21 (7): 567–576. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(98\)00027-9](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(98)00027-9).
8. Casi Á., Aranguren P., Araiz M., Sanchez D., Cabello R., Astrain D. “Experimental evaluation of a transcritical CO₂ refrigeration facility working with an internal heat exchanger and a thermoelectric subcooler: Performance assessment and comparative”. *International Journal of Refrigeration*. 2022; 141: 66–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.05.024>.
9. Mendez C. M., et al. “sCO₂ power cycles summit summary November 2017”. U.S. Department of Energy. 2017. DOI: <https://doi.org/10.2172/1435490>.
10. Morozuk L. I., Haiduk S. V. “Komresorna teplovykorystalna kholodylna mashyna [UA Patent No. 72660]”. *Ukrainian Intellectual Property Institute*. 2012.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.83>

UDC 621.574

Prospects for the Application of Compressor-Type Heat-Utilizing Refrigeration Machines with CO₂ for energy-efficient systems

Serhii V. Haiduk¹

PhD, Senior lecturer of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1627-2986>; gayduck.sergei@gmail.com. Scopus Author ID: 57170822000

Oleksandr S. Verdysh¹⁾

Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8822-7108>; 10253021@stud.op.edu.ua

Yelyzaveta Yu. Zhevniak¹⁾

Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5051-5969>; 10253044@stud.op.edu.ua

Daria O. Ternova¹⁾

Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7465-0747>; 10253035@stud.op.edu.ua

¹⁾ Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The article examines modern approaches to improving energy efficiency using thermally driven refrigeration machines. A detailed review of the main types of such machines – ejector, adsorption, absorption, and compressor systems – is presented, highlighting their advantages, limitations, and typical application areas. Particular attention is given to compressor thermally driven refrigeration machines, in which heat conversion processes are integrated with cold production. This approach allows for the effective utilization of low-grade and waste heat in complex energy systems.

The study proposes a new schematic design of a compressor thermally driven refrigeration machine using carbon dioxide as the working fluid. A thermodynamic analysis of its reference cycle was conducted, assessing the impact of pressure and temperature in the gas heater on the energy conversion coefficient, which allowed the identification of optimal operating modes. The results demonstrated that increasing the pressure and temperature in the gas heater significantly improves the machine's energy efficiency, exceeding the performance of most existing thermally driven refrigeration machines.

The obtained results confirm the feasibility of applying the proposed scheme to enhance the efficiency of complex energy systems and expand the potential for low-grade heat utilization. Thus, the investigated solution represents a competitive alternative to existing technologies and can serve as a basis for the development of energy-efficient and environmentally safe cooling and trigeneration systems.

Keywords: Thermally driven refrigeration machines; compressor systems; carbon dioxide; thermodynamic analysis; energy conversion coefficient; heat utilization; energy efficiency; trigeneration; energy systems; process modelling; innovative technologies; energy saving