

Г. Г. Заруба, аспірант, М. Г. Хмельнюк, д. техн. н., професор

ОПТИМІЗАЦІЯ ВМІСТУ R744 У СУМІШАХ З R290, R600, R600A, R170 ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Ключові слова: бінарні суміші, R744, R290, R600, R600a, R170, енергоефективність, COP, об'ємна холодопродуктивність.

Вступ і аналіз публікацій. Енергозбереження та скорочення викидів стали актуальними темами на виконання вимог угоди COP28, яка підтвердила конкретну мету утримати зростання глобальної температури в межах 1.5 °C від рівня, що передував початку індустріальної ери, як зазначено в доповіді UNFCCC [1]. Для досягнення цієї мети необхідні ефективні заходи, спрямовані на стимулювання використання більш екологічно безпечних робочих речовин. Для вирішення цього питання одним з найпривабливіших підходів є використання природних холодоагентів. Особливого поширення набули вуглеводні, такі як R290, R1270, R600a і R600, а також діоксид вуглецю (R744) і аміак (R717). Їх привабливість досягається завдяки природному походженню і легкій доступності.

Вуглеводні, що використовуються як холодоагенти, мають чудові теплофізичні властивості, вони нетоксичні та екологічно чисті. Однак при виборі та проектуванні системи слід ретельно враховувати їхню горючість. R744, з іншого боку, також нетоксичний і екологічно чистий, не горить, легкодоступний і має високу об'ємну холодопродуктивність. Однак високий тиск і низька температура критичної точки обмежують його застосування [2].

Одним з можливих шляхів усунення існуючих недоліків представлених холодоагентів може бути отримання нового робочого тіла шляхом цілеспрямованого змішування двох або більше чистих холодоагентів. Змішування вуглеводнів з незаймистим R744 має дві переваги. По-перше, вища нижня межа займистості порівняно з чистими вуглеводнями розширює діапазон застосування холодоагенту. По-друге, деякі суміші характеризуються нижчим робочим тиском і, відповідно, вищою критичною точкою порівняно з чистим R744, що також розширює діапазон застосування холодоагенту. Однією з характеристик цих сумішей також буде змінна температура випаровування/конденсації. Крім того, порівняно з чистими вуглеводнями, суміш матиме вищу об'ємну холодопродуктивність.

Виявлено, що суміші демонструють хороші показники коефіцієнта перетворення (COP) та об'ємної холодопродуктивності (q_v) у дослідженні Yelishala та ін. [3]. У дослідженні Niu та Zhang бінарна суміш R744/R290 (71/29 %) показала вищу холодопродуктивність і COP порівняно з R13 [4]. Fan та ін. (2014) теоретично проаналізували суміші R744/R600a і R744/R600, отримані сполуки 18/82 % для першої і 10/90 % для другої продемонстрували значне зростання COP та q_v для обох у порівнянні з R114, R123 і R142b [5]. Jemni та ін. дослідили суміші R744 з R1270, R290, R170 і R600a і виявили, що співвідношення 50/50 % покращує COP на 14 % для R744/R290 і на 36 % для R744/R1270 [6]. Nasruddin та ін. провели аналіз природних сумішей R744 з R290, R170 і R1150, визначивши оптимальні масові частки: 94/6 % для R744/R290, 64/36 % для

R744/R170 – і 37/63 % для R744/R1150 [7]. Ganesan та ін. підтвердили, що суміші R744/600 і R744/601 з масовим співвідношенням 5/95 % для обох збільшують COP на 20 % порівняно з використанням чистих робочих рідин [8]. Vassago та ін. встановили, що найкращі результати було отримано для суміші R744/R1270 з масовою часткою 77/23 %, яка підвищила COP на 28 % порівняно з чистим R744 [9].

Методологія. Визначення циклу та сумішей. Для теоретичного аналізу використовується проста одноступенева холодильна установка з ідеальним поршневим компресором, яка може працювати в до- і надкритичному циклі, як показано на рис. 1.

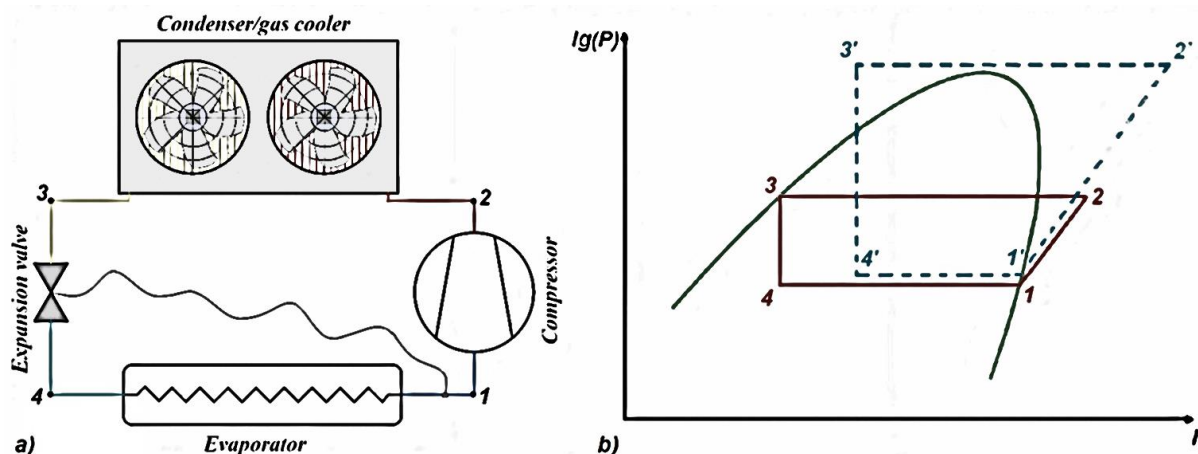


Рисунок 1 – а) Принципова схема ХУ; б) Холодильний цикл на діаграмі $\lg(P)$ - h : суцільна лінія – докритичний цикл; пунктирна лінія – надкритичний цикл

В якості досліджуваних холодоагентів були обрані бінарні суміші діоксиду вуглецю (R744) та вуглеводнів: пропану (R290), бутану (R600), ізобутану (R600a) та етану (R170). Вибір холодоагентів для дослідження був зроблений на основі можливості порівняння даних, які може надати математична модель, з експериментальними даними, отриманими Хмельнюком [10]. Основні властивості змішаних рідин були взяті з програми RefProp v.10.0, розробленої Lemmon та ін. [11], і наведені в табл. 1, де M – молярна маса, NBP – нормальна температура кипіння, P_{crit} і T_{crit} – тиск і температура в критичній точці.

Таблиця 1 – Основні властивості аналізованої речовин

Робоча речовина	M , кг/кмоль	NBP , °C	P_{crit} , МПа	t_{crit} , °C
R744	44.01	-78.464	7.3773	30.978
R290	44.096	-42.114	4.2512	96.74
R600	58.122	-0.49	3.796	151.98
R600a	58.122	-11.749	3.629	134.66
R170	30.069	-88.581	4.8722	32.172

Обчислювальна модель. Для спрощення моделювання були зроблені деякі припущення: перепади тиску всередині трубопроводів і теплообмінників відсутні; система працює в усталеному режимі; суміші не враховують вплив мастила на їх властивості; процес стиснення є ізентропійним. В даній роботі горючість кінцевої суміші не буде

враховуватися при виборі оптимального значення фракції R744. Для оцінки властивостей сумішей робочих рідин використовується програмний інструмент NIST Refprop 10.0 в інтегрованому середовищі розробки PyChart. Хоча отримання параметрів сумішей в Refprop може призвести до невеликих відхилень, порівняння експериментальних даних, наведених Хмельнюком [10], з даними, отриманими за допомогою Refprop, показало, що середньоквадратичне відхилення для всіх сумішей становить менше 5 %.

Таблиця 2 – Вихідні дані моделі

Символ	Опис	Значення
t_h	Температура відведення тепла / конденсації	30 °C
t_0	Температура випаровування	-30 °C

У табл. 2 наведено набір вхідних даних, необхідних для моделювання, який застосовується до всіх вищезазначених сумішей. Для того, щоб визначити максимальне значення COP для кожної з сумішей, модель змінює мольну частку R744 в суміші з точністю до 0.5 %. Цей процес дозволяє визначити оптимальний склад суміші для досягнення найвищого значення COP, що, в свою чергу, сприяє більш ефективній роботі системи.

Щоб знайти значення COP для конкретної суміші, ми оптимізуємо тиск тепловідведення (P_h) і тиск випаровування (P_0) за таких умов:

Для докритичного режиму приймаємо, що тиск P_h повинен відповідати значенню, за якого виконується умова рів. 1, як це рекомендує ASERCOM [12] у своєму керівництві.

$$\frac{T_2 + T_3}{2} = T_h, \quad (1)$$

де T_2 і T_3 – значення температури суміші на вході і виході з конденсатора відповідно.

Для надкритичного режиму приймаємо, що тиск P_h повинен відповідати значенню, при якому виконується умова рів. 2, коли середня температура тепловідведення в газоохолоджувачі дорівнює t_h .

$$COP = \max \left(\frac{q_0}{l_a} \right)_h. \quad (2)$$

Питома холодопродуктивність та робота стиснення компресора відповідно:

$$q_0 = h_1 - h_4, \quad (3)$$

$$l_a = h_2 - h_1, \quad (4)$$

де h_4 і h_1 – питома ентальпії суміші на вході і виході з випарника, відповідно; h_1 та h_2 – питома ентальпії суміші на вході та виході з компресора, відповідно.

За надкритичного режиму температура на виході з газоохолоджувача:

$$T_3 = T_h \cdot 2 - T_2. \tag{5}$$

Для всіх режимів роботи приймаємо, що тиск P_0 повинен відповідати значенню, за якого виконується умова рів.6, як це рекомендує ASERCOM [12] у своєму керівництві.

$$\frac{T_4 + T_1}{2} = T_0, \tag{6}$$

де T_4 і T_1 – значення температури суміші на вході і виході з випарника відповідно.

Цей алгоритм виконується для кожного співвідношення масових часток вуглекислого газу і вуглеводнів, де коефіцієнт перетворення і об'ємна холодопродуктивність визначаються відповідно:

$$COP = \frac{q_0}{l_a}; \tag{7}$$

$$q_v = \frac{h_1 - h_4}{v_1}, \tag{8}$$

де v_1 – значення питомого об'єму суміші на вході в компресор.

Значення параметрів у ключових точках, необхідні для наведених вище розрахунків, знайдені за допомогою стандартного методу побудови холодильних циклів.

Дана модель і методика оптимізації тисків кипіння та тепловідведення дозволяють знайти такі співвідношення компонентів суміші, що працюють в системах охолодження, які забезпечать оптимальну ефективність і продуктивність при одночасному зниженні енерговитрат.

Результати та обговорення. Використовуючи описану вище модель, було знайдено значення COP і q_v для кожного співвідношення компонентів у суміші при будь-якому режимі роботи. А також оптимальні значення молярних часток, які забезпечують максимальний COP. Результати розрахунків коефіцієнта перетворення та об'ємної холодопродуктивності сумішей наведені на рис. 2 та рис. 3.

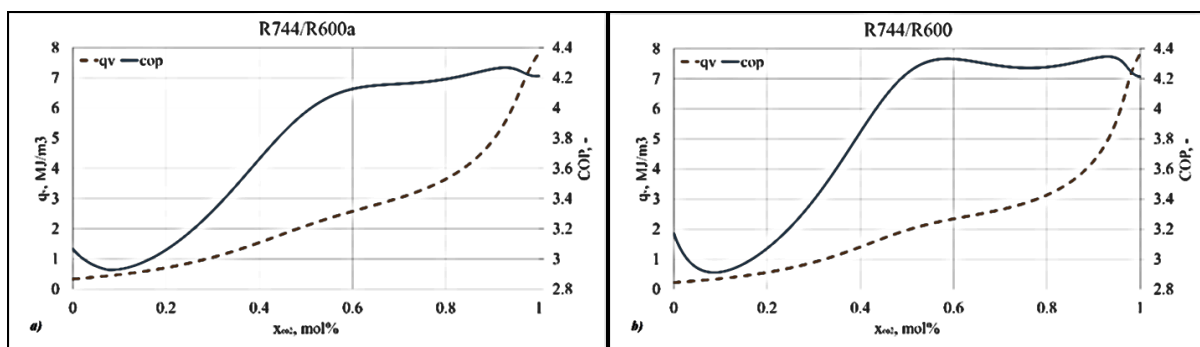


Рисунок 2 – Вплив молярної частки R744 (x_{CO_2}) в суміші на COP (суцільна лінія) та q_v (пунктирна лінія): а) суміш R744/R600a; б) суміш R744/R600

При використанні суміші R744/R600a для будь-якого мольного співвідношення фракцій робочі цикли залишалися докритичними. На основі розрахунків було визначено, що оптимальною концентрацією в суміші є 93 % R744 і 7 % R600a. При такому співвідношенні COP на 39.2 % вище, ніж у чистого R600a, і становить 4.268 одиниць. При цьому об'ємна холодопродуктивність зростає в 16.8 разів і становить 5.613 МДж/м³. P_0 в такій суміші зростає в 20.1 разів, а P_h – у 8 разів порівняно з чистим R600a. Спостережувані «вигини» і мінливість даних на цьому графіку та наступних пов'язані з особливостями оптимізації за середніми температурами процесів кипіння і конденсації, а також з властивостями сумішей.

Суміші R744/R600 з будь-яким мольним співвідношенням фракцій працюють в докритичних циклах. На отриманому графіку можна помітити два «піки» значень COP, які становлять 4.332 при мольній частці R744 58.5 % і 4.347 при мольній частці R744 93 %. Перший «пік» забезпечує дещо нижчі значення COP при збільшенні P_0 в 10.3 разів і збільшенні P_h в 5.5 разів порівняно з чистим R600. Другий «пік», незважаючи на дещо вищий COP, має P_0 у 28.2 рази і P_h у 10 разів більше відносно чистого R600. Через це пропонується обрати на суміші 58.5 % R744 і 41.5 % R600 через значно нижчі тиски, хоча і трохи менший COP, таке рішення дозволить заощадити на компресорі та його обслуговуванні, а також забезпечить більшу безпеку експлуатації системи. Однак, якщо потрібна більша пожежна безпека, суміш R744/R600 (93%/7%) може бути відмінним кандидатом. Суміш 58.5/41.5 % має COP на 36.6 % вищий, ніж чистий R600, а її об'ємна холодопродуктивність в 10.2 рази вища, ніж у чистого R600, і становить 2.296 МДж/м³.

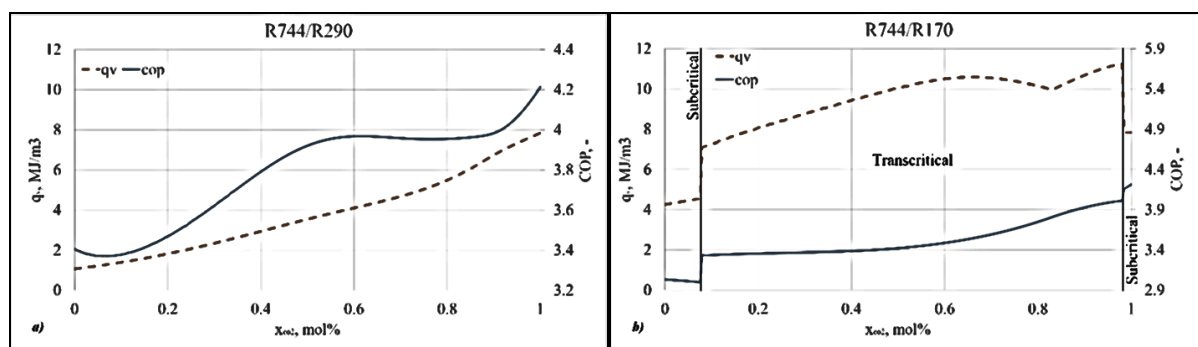


Рисунок 3 – Вплив молярної частки R744 (x_{CO_2}) в суміші на COP (суцільна лінія) та q_v (пунктирна лінія): а) суміш R744/R290; б) суміш R744/R170

Суміш R744/R290, при будь-якому співвідношенні мольних часток, забезпечувала підкритичну роботу. На графіку показано, що при додаванні R744 до R290 COP зростає з 3.406 при нульовій концентрації R744 до 4.213 при стовідсотковій концентрації R744. На графіку можна спостерігати «плато» в межах молярної концентрації R744 приблизно від 55 % до 90 %, де значення COP коливається в районі 3.96 одиниць. Чистий R744 перевершує суміш як за COP, так і за об'ємною холодопродуктивністю. Однак є і недоліки: тиски, при яких працює R744, перевищують робочі тиски чистого R290 у 8.5 разів для P_0 і 4.8 для P_h . Отримані дані свідчать про неефективність використання суміші R744/R290 в холодильній системі за даних умов.

На графіку суміші R744/R170 можна спостерігати декілька стрибків значень COP та об'ємної холодопродуктивності, що пов'язано з переходом між режимами роботи та з особливостями процесу оптимізації. Так, при молярній частці R744 від 0 % до 7,5 % цикл працює в докритичному режимі. Потім відбувається перехід в надкритич-

ний режим і від 8 % до 56.5 % спостерігається підвищення тиску P_h у результаті процесу оптимізації за максимальним значенням COP. Від молярної частки R744, що дорівнює 57 % до 83 %, спостерігається зниження тиску P_h також за рахунок оптимізації. Оскільки подальша максимізація COP вимагає подальшого зниження тиску P_h , а при значенні молярної частки R744 у 83 % досягається критичний тиск суміші, то наступні оптимальні тиски P_h сумішей дорівнюють критичним тискам до значення молярної частки R744, що дорівнює 98 %. Потім від 98.5 % до 100 % повертаємося до докритичного режиму роботи. У такому випадку використання суміші R744/R170 за даних умов є не ефективним, оскільки COP досягає максимального значення 4.213 для чистого R744, що на 39 % вище, ніж значення COP для чистого R170. В той же час, збільшення P_0 і P_h залишається відносно незначним – в 1.3 і 1.2 рази, відповідно.

Таким чином, можна чітко бачити, що вибір оптимальної суміші холодоагентів залежить від конкретних вимог до системи, включаючи ефективність, безпеку та економічну вигоду. Це підкреслює важливість індивідуального підходу до кожного проекту та умов його експлуатації. Загалом, результати дослідження підкреслюють важливість оптимізації сумішей для максимізації ефективності холодильних циклів. Оптимальні співвідношення сумішей можуть бути використані для підвищення енергоефективності, а подальші дослідження можуть бути спрямовані на поглиблений аналіз впливу різних параметрів на продуктивність холодильних циклів з метою оптимізації їх роботи.

Висновки. Важливість дослідження альтернативних холодоагентів для вирішення екологічних проблем та підвищення енергоефективності холодильних систем неможливо переоцінити. У цьому контексті теоретичний аналіз бінарних сумішей на основі R744, описаний у цій статті, пропонує цінну інформацію про потенційних кандидатів для оптимізації холодильного циклу. Розглядаючи такі параметри, як коефіцієнт продуктивності (COP) та об'ємна холодопродуктивність (q_v), дослідники прагнуть виявити композиції сумішей, які забезпечують кращу продуктивність, ніж окремі холодоагенти.

Серед досліджуваних сумішей, комбінації R744 (діоксид вуглецю) з вуглеводнями R600 (бутан) і R600a (ізобутан) виглядають перспективними варіантами. Оптимізовані молярні співвідношення 58.5/41.5 % для R744/R600 і 93/7 % для R744/R600a показують значне поліпшення COP, з відповідним збільшенням приблизно на 36.6 % і 39.2 % у порівнянні з чистими R600 і R600a. Крім того, об'ємна холодопродуктивність цих сумішей значно зростає, приблизно в 10.2 і 16.8 разів відповідно, що вказує на їх потенціал для створення ефективних охолоджувальних рішень.

Однак дослідження виявило обмеження, пов'язані з деякими складами сумішей. Наприклад, суміш R744/R290 працює гірше, ніж чистий R744, що вказує на те, що додавання R290 не дає очікуваних переваг. Аналогічно, суміш R744/R170 вважається не ефективною через нижчий показник COP порівняно з чистим R744. Крім того, суміш діоксиду вуглецю з етаном у переважній більшості співвідношень працювала в надкритичному режимі. Ці результати підкреслюють важливість ретельного підбору компонентів суміші для отримання максимального приросту продуктивності.

Таким чином, хоча суміші R744/R600 і R744/R600a є перспективними як альтернатива чистим R600 і R600a, необхідні подальші теоретичні дослідження, а також експериментальні випробування для підтвердження їх продуктивності за різних умов експлуатації. Вивчення та покращення потенціалу бінарних сумішей на основі R744 сприяє розвитку більш енергоефективних та екологічно стійких холодильних технологій.

Література

1. UN Climate Change Conference – United Arab Emirates // UNFCCC: [Веб-сайт]. Dubai, 2023. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/un-climate-change-conference-united-arab-emirates-nov/dec-2023/about-cop-28> (дата звернення: 09.09.2024).
2. Performance Analysis of CO₂/Natural Refrigerants for Cascade Refrigeration System / Laguri V. та ін. // Зб. мат-в кон-цій / The sixth International Conference on Polygeneration. Сарагоса: Engineering Research Institute of the Universidad de Zaragoza, 2021. 219 С. 1–10.
3. Thermodynamic Study on Blends of Hydrocarbons and Carbon Dioxide as Zeotropic Refrigerants / Yelishala S. та ін. // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2020., вип. 8 Т. 142. С. 1–29.
4. Niu B., Zhang Y. Experimental study of the refrigeration cycle performance for the R744/R290 mixtures // International Journal of Refrigeration. 2007., вип. 1 Т. 30. С. 37-42.
5. Thermodynamic comparison of R744/R600A and R744/R600 used in mid-high temperature heat pump system / Fan X. W. та ін. // Thermal Science. 2014., вип. 5 Т. 18. С. 1655–1659.
6. Performance Investigation of Cascade Refrigeration System Using CO₂ and Mixtures / Jemni N. та ін. // International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration. 2015., вип. 3 Т. 23. 1550022.– С. 1–9.
7. Thermoeconomic Optimization of Cascade Refrigeration System Using Mixed Carbon Dioxide and Hydrocarbons at Low Temperature Circuit / Nasruddin N. та ін. // Makara Journal of Technology. 2016., вип. 3 Т. 20. С. 132–138.
8. Ganesan P., Eikevik T. M. New zeotropic CO₂-based refrigerant mixtures for cascade high-temperature heat pump to reach heat sink temperature up to 180 °C // Energy Conversion and Management: X. 2023., Т. 20. 100407 С. 1–16.
9. Vaccaro G., Milazzo A., Talluri L. A proposal for a non-flammable, fluorine-free, CO₂-based mixture as a low TEWI refrigerant // International Journal of Refrigeration. 2023., Т. 158. С. 158–163.
10. Хмельнюк М.Г. Смеси углекислоты с углеводородами как натуральные хладагенты холодильных машин // Холодильная техника и технология. 1998., вип. 59 Т. 92. С. 63–68.
11. Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP Version 10.0 [Електронний ресурс]: Standard Reference Data Program / Lemmon E. W. та ін. / The National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, 2018. Повна ліцензія.
12. Refrigerant Glide and Effect on Performances Declaration // ASERCOM: [Веб-сайт]. Брюссель, 2021. URL: <https://asercom.org/wp-content/uploads/2021/01/Refrigerant-Glide-and-Effect-on-Performances-Declaration.pdf> (дата звернення: 09.09.2024).

Bibliography (transliterated)

1. UN Climate Change Conference – United Arab Emirates // UNFCCC: [Veb-sayt]. Dubai, 2023. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/un-climate-change-conference-united-arab-emirates-nov/dec-2023/about-cop-28> (data zvernennya: 09.09.2024).
2. Performance Analysis of CO₂/Natural Refrigerants for Cascade Refrigeration System / Laguri V. ta in. // Zb. mat-v kon-tsiy / The sixth International Conference on Polygener-

ation. Sarahosa: Engineering Research Institute of the Universidad de Zaragoza, 2021. 219 p. 1–10.

3. Thermodynamic Study on Blends of Hydrocarbons and Carbon Dioxide as Zeotropic Refrigerants / Yelishala S. ta in. // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2020., vip. 8 T. 142. P. 1–29.

4. Niu B., Zhang Y. Experimental study of the refrigeration cycle performance for the R744/R290 mixtures // International Journal of Refrigeration. 2007., vip. 1 T. 30. P. 37–42.

5. Thermodynamic comparison of R744/R600A and R744/R600 used in mid-high temperature heat pump system / Fan X. W. ta in. // Thermal Science. 2014., vip. 5 T. 18. P. 1655–1659.

6. Performance Investigation of Cascade Refrigeration System Using CO₂ and Mixtures / Jemni N. ta in. // International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration. 2015., vip. 3 T. 23. 1550022 P. 1–9.

7. Thermoeconomic Optimization of Cascade Refrigeration System Using Mixed Carbon Dioxide and Hydrocarbons at Low Temperature Circuit / Nasruddin N. ta in. // Makara Journal of Technology. 2016., vip. 3 T. 20. P. 132–138.

8. Ganesan P., Eikevik T.M. New zeotropic CO₂-based refrigerant mixtures for cascade high-temperature heat pump to reach heat sink temperature up to 180 °C // Energy Conversion and Management: X. 2023., T. 20. 100407 P. 1–16.

9. Vaccaro G., Milazzo A., Talluri L. A proposal for a non-flammable, fluorine-free, CO₂-based mixture as a low TEWI refrigerant // International Journal of Refrigeration. 2023. T. 158. P. 158–163.

10. Khmel`nyuk M. H. Smesi uhlekisloty s uhlevodorodami kak natural`nye khladahenty kholodil`nykh mashin // Kholodil`naya tekhnika i tekhnolohiya. 1998., vip. 59 T. 92. P. 63–68.

11. Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP Version 10.0 [Elektronniy resurs]: Standard Reference Data Program / Lemmon E. W. ta in. / The National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, 2018. Povna litsenziia.

12. Refrigerant Glide and Effect on Performances Declaration // ASERCOM: [Veb-sayt]. Bryussel`, 2021. URL: <https://asercom.org/wp-content/uploads/2021/01/Refrigerant-Glide-and-Effect-on-Performances-Declaration.pdf> (data zvernennya: 09.09.2024).

УДК 621.564

Г. Г. Заруба, аспірант, М. Г. Хмельнюк, д. т. н., професор

ОПТИМІЗАЦІЯ ВМІСТУ R744 У СУМІШАХ З R290, R600, R600A, R170 ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНОЇ СИСТЕМИ

У даній роботі здійснено загальний теоретичний аналіз бінарних сумішей холодоагентів на основі R744 (вуглекислий газ) у поєднанні з певними вуглеводнями, зокрема R290 (пропан), R600 (бутан), R600a (ізобутан) та R170 (етан). Основною метою дослідження було визначення оптимальних мольних співвідношень для кожної з сумішей, що забезпечують максимізацію коефіцієнта перетворення (COP) – показника, який характеризує енергоефективність системи охолодження. Крім того, було проведено

аналіз об'ємної холодопродуктивності (q_v), що є важливим критерієм для оцінки загальної ефективності роботи холодильних систем.

В рамках дослідження проаналізовано роботу холодильних систем з урахуванням як докритичних, так і надкритичних режимів. У якості початкових параметрів для побудови математичної моделі використовувалися температури кипіння та конденсації/відведення тепла, що визначалися як середні значення температур процесів у теплообмінних апаратах. Такий підхід дозволив забезпечити точне підтримання заданої температури в холодильній камері.

Найкращі результати були отримані для сумішей R744/R600 та R744/R600a. R744/R600 за пропорції 58.5/41.5 % має COP на 36.6 % вищий, ніж у чистого R600, а об'ємна холодопродуктивність збільшилася у 10,2 раза. Аналогічні успішні результати продемонструвала суміш R744/R600a з оптимальним співвідношенням 93/7 %, що показала приріст COP на 39.2 % та збільшення об'ємної холодопродуктивності у 16.8 раза порівняно з чистим R600a.

Проте, дослідження показало, що використання суміші R744/R290 виявилось менш ефективним через порівняно нижчі показники COP та об'ємної холодопродуктивності порівняно з чистим R744. Подібні висновки були зроблені для суміші R744/R170, яка також продемонструвала нижчу ефективність порівняно з чистим R744. Водночас зазначено, що в більшості співвідношень компонентів суміш працює в надкритичному режимі. Це свідчить про недоцільність застосування таких сумішей холодоагентів за заданих вихідних параметрів для підвищення енергоефективності. Даний результат підкреслює важливість ретельного підбору компонентів сумішей для досягнення оптимальних показників.

Загалом результати дослідження демонструють, що використання сумішей R744 з R600 і R600a може стати перспективною альтернативою для підвищення енергоефективності холодильних систем. Оптимізація молярних часток дозволяє досягти значного покращення COP і суттєвого збільшення об'ємної холодопродуктивності, що робить такі суміші перспективними кандидатами для практичного застосування. Однак, для остаточного підтвердження цих висновків потрібна подальша розробка поглибленої математичної моделі, що буде наближена до реальних умов експлуатації, а також проведення експериментальних досліджень, що дозволять перевірити фактичні показники ефективності цих сумішей і виявити можливі обмеження їх використання.

Ключові слова: бінарні суміші, R744, R290, R600, R600a, R170, енергоефективність, COP, об'ємна холодопродуктивність.

H. H. Zaruba, PhD student, M. H. Khmelniuk, D.Sc, professor

OPTIMIZATION OF R744 CONTENT IN MIXTURES WITH R290, R600, R600A, R170 TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF THE REFRIGERATION SYSTEM

This paper presents a general theoretical analysis of binary refrigerant blends based on R744 (carbon dioxide) in combination with certain hydrocarbons, including R290 (propane), R600 (butane), R600a (isobutane), and R170 (ethane). The main goal of the study was to determine the optimal molar ratios for each of the mixtures that maximize the coefficient of performance (COP), an indicator that characterizes the energy efficiency of the cooling system.

In addition, the volumetric cooling capacity (qv) was analyzed, which is an important criterion for assessing the overall efficiency of refrigeration systems.

The study analyzed the operation of refrigeration systems, taking into account both subcritical and supercritical conditions. As initial parameters for building a mathematical model, the boiling and condensation/heat removal temperatures were used, which were determined as the average values of the process temperatures in heat exchangers. This approach ensured accurate maintenance of the set temperature in the refrigerating chamber.

The best results were obtained for R744/R600 and R744/R600a blends. R744/R600 in the proportion of 58.5/41.5 % has a COP 36.6 % higher than that of pure R600, and the volumetric cooling capacity increased by 10.2 times. Similarly successful results were demonstrated by the R744/R600a blend with an optimal ratio of 93/7 %, which showed a 39.2 % increase in COP and a 16.8-fold increase in volumetric cooling capacity compared to pure R600a.

However, the study showed that the use of a R744/R290 blend was less efficient due to relatively lower COP and volumetric cooling capacity compared to pure R744. Similar conclusions were drawn for the R744/R170 blend, which also demonstrated lower efficiency compared to pure R744. At the same time, it is noted that in most component ratios, the mixture operates in a supercritical mode. This indicates that it is inexpedient to use such refrigerant blends at the given initial parameters to improve energy efficiency. This result emphasizes the importance of careful selection of blend components to achieve optimal performance.

Overall, the study results demonstrate that the use of R744 blends with R600 and R600a can be a promising alternative to improve the energy efficiency of refrigeration systems. Optimization of the molar fractions can achieve a significant improvement in COP and a significant increase in volumetric cooling capacity, making such blends promising candidates for practical use. However, further development of an in-depth mathematical model that will be close to real operating conditions, as well as experimental studies to verify the actual performance of these blends and identify possible limitations of their use, are required to confirm these conclusions.

Keywords: binary mixtures, R744, R290, R600, R600a, R170, energy efficiency, COP, volumetric cooling capacity.