

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.57

Оптимізація режиму роботи холодильної машини, що працює на зеотропній суміші холодильних агентів

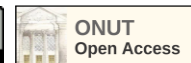
*М. Б. Кравченко*¹✉, *С. В. Кокул*²,¹⁻²Одеський національний технологічний університет, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082, Україна✉ e-mail: ¹kravtchenko@i.uaORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-9310-2166>

Кріорефрижератори Джоуля-Томсона, що працюють на сумішевих робочих тілах, мають значні переваги у порівнянні з охолоджувачами, які використовують чисті холодильні агенти. При оптимізації складу зеотропних сумішей холодильних агентів необхідно враховувати особливості роботи компресорів об'ємної дії. Відомо, що коефіцієнт подавання поршневого компресора суттєво залежить від ступеню стиснення та тиску нагнітання компресора. Тому проводити оптимізацію складу зеотропних сумішей холодильних агентів при фіксованій молярній витраті суміші з практичної точки зору є недоцільним. В статті описаний метод оптимізація режиму роботи холодильної машини, що працює на п'ятикомпонентній зеотропній суміші холодильних агентів. В якості цільової функції обрана максимальна холодопродуктивність установки, яка побудована на базі герметичного компресора TAG 2513Z, при температурі об'єкту охолодження 120 К. Метою дослідження є створення відносно простої математичної моделі такого компресора, яка повинна пов'язати тиски на всмоктуванні та нагнітання з коефіцієнтом об'ємного подавання компресора. При оптимізації варіювалися такі параметри: тиски нагнітання і всмоктування компресора, склад п'ятикомпонентної робочої суміші, а також температура перед дросельним вентилем і температура на вході в фазовий сепаратор. В результаті обробки результатів чисельного експерименту, був отриманий аналітичний вираз, який наближено описує роботу холодильної установки залежно від восьми параметрів, що варіювалися. Це дозволило знайти оптимальний режим роботи холодильної машини, при якому досягається максимум холодопродуктивності. При оптимальному режимі роботи холодильної установки тиск всмоктування дорівнює 2,4 бар, тиск нагнітання – 17,3 бар. За оптимального складу робочої речовини досягається максимальна холодопродуктивність 54,7 Вт.

Ключові слова: Цикл Кліменка; Сумішевий холодоагент; Компресор; Коефіцієнт об'ємного подавання; Оптимізація; Кріорефрижератор

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v58i2.2380>

© The Author(s) 2022. This article is an open access publication
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Вступ

Охолоджувачі Джоуля-Томсона що працюють на зеотропних сумішах холодильних агентів, мають великі переваги у порівнянні з охолоджувачами, які використовують чисті холодильні агенти. В цьому напрямку проведена велика дослідницька ро-

бота у багатьох інститутах по всьому світу [1-5].

До теперішнього часу більшість математичних моделей холодильних циклів, що працюють на зеотропних сумішах, були розроблені на основі припущення про те, що в установці циркулює задана молярна маса робочої речовини [4,5]. Однак такий підхід не відповідає дійсності в реальних умовах.

Відомо, що коефіцієнт подавання поршневого компресора суттєво залежить від ступеню стиснення та тиску нагнітання компресора. Тому проводити оптимізацію складу зеотропних сумішей холодильних агентів при фіксованій молярній витраті суміші, як це робиться у багатьох роботах, з практичної точки зору, є недоцільним.

При оптимізації складу зеотропних сумішей холодильних агентів необхідно враховувати особливості роботи компресорів об'ємної дії. Тому в якості цільової функції при оптимізації циклів кріорефрижераторів Джоуля-Томсона доцільно обирати максимальну холодопродуктивність на заданому температурному рівні для заданого компресора, або мінімальну температуру, яка досягається при заданій холодопродуктивності, знову ж, для заданого компресора.

У такому випадку, результатом оптимізації є не тільки склад багатокомпонентної суміші, а ще й тиски на всмоктуванні та нагнітанні компресора і температури в деяких ключових точках. Тому далі буде розглядатися не просто оптимізація складу робочої суміші, а оптимізація режиму роботи холодильної установки.

Нижче буде розглянута оптимізація режиму роботи холодильної машини, побудованої на базі герметичного компресора TAG 2513Z виробництва фірми Tecumseh, що працює на зеотропній суміші холодильних агентів.

Ця установка призначена для зберігання біологічних об'єктів, тому вона повинна забезпечувати охолодження на температурному рівні 120 К. При такій температурі повністю припиняються усі хімічні реакції в клітинах, що є умовою практично нескінченного зберігання цих клітин.

Як відомо, до кріогенної техніки відносять гаульз техніки, яка займається отриманням і використанням температур нижче 120 К. Тому холодильну установку, що розглядається у цій статті можна віднести до кріорефрижераторів.

Використання холодильної установки замість рідкого азоту має низку переваг, найголовнішою з яких є відсутність потреби у постійному підтриманні рівня рідкого азоту, який треба завозити з великої відстані. Друга перевага подібних установок полягає в тому, що загальна витрата енергії на зберігання біологічних об'єктів при охолодженні холодильною установкою виявляється набагато меншою, ніж при використанні рідкого азоту. Економічні наслідки заміни рідкого азоту холодильною установкою виявляються ще більш суттєви-

ми, тому що відпадає потреба у транспортних витратах на постачання рідкого азоту.

2. Моделювання роботи компресора марки TAG 2513Z

Метою дослідження роботи компресора марки TAG 2513Z виробництва фірми Tecumseh є створення відносно простої математичної моделі такого компресора, яка повинна пов'язати тиски на всмоктуванні та нагнітанні компресора з коефіцієнтом об'ємного подавання компресора.

У подальшому ця математична модель буде використана для оптимізації складу робочої суміші та режиму роботи установки, призначеної для отримання температур нижче 120 К.

В холодильних установках, які працюють на чистих холодильних агентах, вибір температур кипіння та конденсації автоматично визначає тиск на всмоктуванні та нагнітанні компресора. При роботі холодильних установок на зеотропних сумішах холодильних агентів тиски на всмоктуванні та нагнітанні компресора, поряд із складом холодильної суміші є додатковими параметрами оптимізації. Якщо врахувати те, що коефіцієнт подавання компресора сильно залежить від тисків на всмоктуванні і нагнітанні цього компресора, то завдання оптимізації складу робочої суміші, яка забезпечує максимум холодопродуктивності при використанні певного компресора, стає важко вирішуваною.

Тому для виявлення оптимального складу суміші холодильних агентів, що забезпечує отримання максимуму холодопродуктивності на заданому температурному рівні при використанні компресора TAG 2513Z, потрібно дати математичний опис залежності коефіцієнта подавання цього компресора від ступеня стиснення та тиску нагнітання.

Побудова математичної моделі компресора проводилася з використанням паспортних даних про холодопродуктивність та споживану потужність компресора TAG 2513Z при його роботі на фреоні R404a, наданих фірмою-виробником [6].

Знаючи температури конденсації та кипіння холодильного агента, можна визначити об'ємну холодопродуктивність установки та коефіцієнт об'ємного подавання компресора при різних тисках на всмоктуванні та нагнітанні компресора.

У матеріалах фірми-виробника наведено величину об'єму, що описується кожним з трьох поршнів компресора TAG 2513Z за один оберт валу – 100,7 см³. По цим даним можна визначити коефі-

цієнт подавання компресора в кожному з сімох режимів роботи, описаних у матеріалах фірми-виробника.

На рис. 1 наведені графіки, які показують розраховану залежність коефіцієнту подавання компресора TAG 2513Z від температури кипіння холодоагента при різних температурах конденсації.

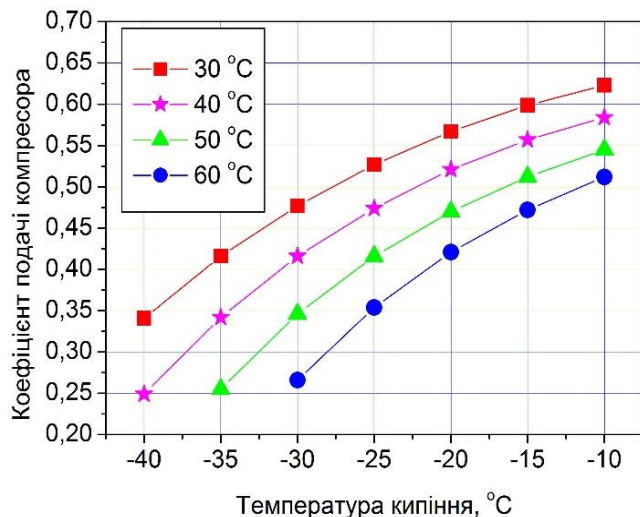


Рисунок 1 – Графіки залежності коефіцієнту подавання компресора TAG 2513Z від температури кипіння холодоагента при різних температурах конденсації

З наведених графіків видно, що з підвищенням температури конденсації холодоагента, коефіцієнт подавання компресора помітно падає. Загальний вигляд отриманих графіків говорить про складний і нелінійний характер залежності коефіцієнту подавання компресора від температур кипіння та конденсації холодоагента.

Знаючи температури кипіння і конденсації холодоагента можна знайти тиски на вході і виході компресора, а також ступінь стиснення для цього компресора. Знаючи це, можна побудувати графіки залежності коефіцієнту подавання компресора від ступені стиснення холодоагента для різних температур конденсації.

На рис. 2 наведені графіки залежності коефіцієнту об'ємного подавання компресора TAG 2513Z від ступеню стиснення та температури конденсації холодоагента (тиску нагнітання).

Залежність коефіцієнту подавання компресора від ступеню стиснення виявилася практично лінійною, а залежність коефіцієнту подавання від тиску нагнітання (температури конденсації) – порівняно слабкою. Тому у першому наближенні, за-

лежністю коефіцієнту подавання від тиску нагнітання можна знехтувати.

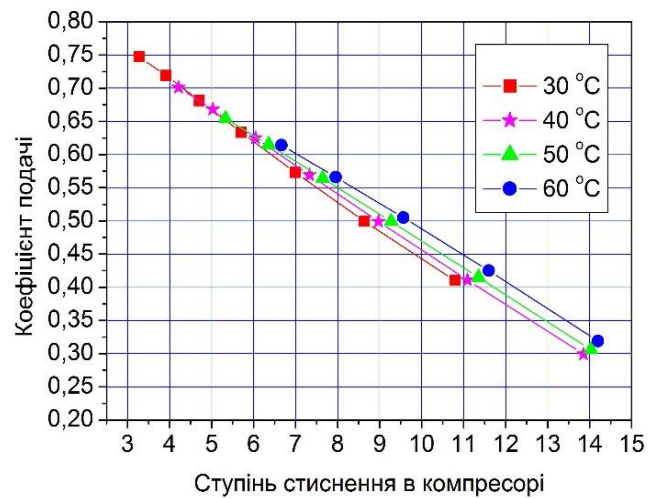


Рисунок 2 – Графіки залежності коефіцієнту подавання компресора від ступені стиснення та температури конденсації холодоагента (тиску нагнітання) для компресора TAG 2513Z

Таким чином, в результаті дослідження залежності коефіцієнту подавання холодильного компресора TAG 2513Z від різних факторів було виведено практично лінійну залежність коефіцієнту подавання компресора від ступеню стиснення газу. Це дозволяє отримати просту емпіричну залежність коефіцієнту подавання компресора від ступеню стиснення, придатну щодо технічних розрахунків.

В результаті апроксимації отриманих даних лінійної залежності за методом найменших квадратів отримано наступну формулу

$$\eta = a \cdot \xi + b, \quad (1)$$

де, η – коефіцієнт подавання компресора; ξ – ступінь стиснення

Виходячи з цієї залежності, отримуємо такі коефіцієнти в формулі 1: $a = -0,0453$; $b = 0,894$.

3. Проведення та обробка результатів чисельного експерименту

Розрахункову схему установки, призначеної для отримання температур нижче 120 K наведено на рис. 3. Установка складається з компресора TAG 2513Z (Compr_1), повітряного теплообмінника для зняття перегріву (Cooler_1), рекуперативного теплообмінника (Cooler_2-Heater_1), фазовий

сепаратор (Flash_4), першого дросельного вентиля (Velve_1), змішувача (Mixer_1), основного теплообмінника (Cooler_3-Heater_13), основного дроселя (Velve_2) і випарника (Heater_0).

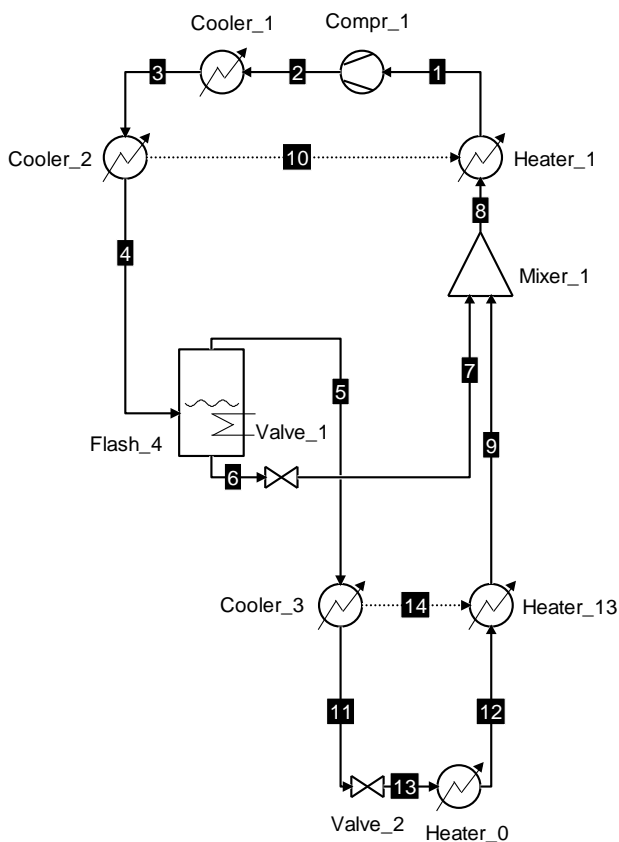


Рисунок 3 – Схема холодильної установки

У якості цільової функції для оптимізації режиму роботи установки обраний максимум холодопродуктивності на температурному рівні 120 К, який можна досягти при використанні компресора TAG 2513Z виробництва фірми Tecumseh. В якості параметрів, що варіюються, обрані наступні: концентрації азоту, метану, етану і пропану в суміші на якій працює установка, тиск нагнітання компресора, тиск всмоктування компресора, температура на вході в фазовий сепаратор і температура суміші перед основним дроселем.

Вміст п'ятого компонента суміші – ізобутану визначався з матеріального балансу суміші.

Для оптимізації такої холодильної машини було складено трирівневий восьмифакторний план чисельного експерименту [7, 8]. Кінцевою метою чисельного експерименту є отримання аналітичної залежності холодопродуктивності установки від вісьмох параметрів (факторів). Список натуральних та кодованих рівнів факторного експерименту наведено у табл. 1. Кодовані значення параметрів, що варіюються, мають значення: -1, 0, +1.

Таблиця 1 – Натуральні та кодовані рівні факторного експерименту

№	Найменування фактора	Натуральне значення	Кодоване значення
1	Тиск нагнітання компресора, бар	12	-1
		14	0
		16	1
2	Вміст азоту (молярна доля)	9	-1
		10	0
		11	1
3	Вміст метану (молярна доля)	47	-1
		48	0
		49	1
4	Вміст етану (молярна доля)	9	-1
		10	0
		11	1
5	Вміст пропану (молярна доля)	3	-1
		4	0
		5	1
6	Тиск всмоктування компресора, бар	1,9	-1
		2	0
		2,1	1
7	Температура на вході в сепаратор, К	288	-1
		289	0
		290	1
8	Температура перед дроселем, К	133	-1
		134	0
		135	1

Як можна побачити з табл. 1, усі 8 параметрів змінюються у відносно невеликих межах. Таке зменшення області пошуку рішення для завдання оптимізації роботи холодильної установки стало можливим завдяки попередній оптимізації режиму роботи установки методом підбору параметрів.

Холодопродуктивність установки на температурному рівні 120 К розраховувалася в програмі COCO ChemSer при однаковій масовій витраті суміші – 100 г/с.

Знаючи залежність коефіцієнту об'ємного подавання компресора TAG 2513Z від ступеню стиснення та густину газу на всмоктуванні компресора легко вирахувати холодопродуктивність установки при роботі з компресором TAG 2513Z.

План багатфакторного чисельного експерименту наведено у табл. 2.

Всього було проведено вісімнадцять розрахунків схеми установки при різних значеннях вісьмох факторів, що варіювалися. Холодопродуктивність установки, перерахована з урахуванням

реального коефіцієнту об'ємного подавання компресора наведена у останній колонці табл. 2. Вона і є результатом чисельного експерименту.

Таблиця 2 – Матриця планування чисельного експерименту

№	Умовний рівень фактора								R, Вт
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	31,1
2	1	-1	-1	1	1	1	1	1	40,6
3	0	0	-1	1	0	0	0	-1	39,3
4	1	0	-1	-1	-1	1	1	1	38,2
5	-1	1	-1	1	0	-1	-1	1	32,4
6	0	1	-1	-1	1	0	0	1	37,9
7	0	-1	0	0	0	1	-1	-1	36,5
8	1	-1	0	1	1	-1	0	0	42,7
9	-1	0	0	0	1	0	1	1	36,7
10	0	0	0	1	-1	1	-1	1	39,8
11	-1	1	0	1	0	0	-1	-1	35,1
12	1	1	0	0	-1	-1	0	-1	37,1
13	-1	-1	1	-1	-1	1	0	0	38,1
14	0	-1	1	0	0	-1	1	0	36,6
15	-1	0	1	0	1	1	0	0	39,4
16	1	0	1	-1	0	0	-1	-1	38,8
17	0	1	1	-1	1	-1	1	0	38,1
18	1	1	1	0	-1	0	-1	0	39,2

Обробку результатів розрахунків холодопродуктивності на суміші з 5-х компонентів проведено з метою отримання аналітичної залежності холодопродуктивності установки від вісьмох факторів, що варіювалися.

Цю аналітичну функцію від восьми незалежних параметрів, будемо шукати у вигляді суми функцій, кожна з яких залежить тільки від одного фактору:

$$R = \sum_8 f_i(x_i), \quad (2)$$

де $f_i(x_i) = a_i x_i^2 + b_i x_i + c_i$.

При обробці результатів чисельного експерименту для кожного фактора було знайдено середнє значення результатів чисельних експериментів в яких ця змінна приймала однакоє значення:

$$f_i(x_i^0) = \frac{\sum R_i^0}{6}; f_i(x_i^{-1}) = \frac{\sum R_i^{-1}}{6}; f_i(x_i^{+1}) = \frac{\sum R_i^{+1}}{6}. \quad (3)$$

Далі, за трьома точками, отриманими для кожної змінної, будувався поліном другого ступеня. Для цього використовувалась інтерполяційна формула Лагранжа:

$$f(x) = \left[\frac{f_{-1}}{2} - f_0 + \frac{f_{+1}}{2} \right] x^2 + \left[\frac{f_{+1}}{2} - \frac{f_{-1}}{2} \right] x + f_0$$

Для спрощення розрахунків, вводимо нові змінні:

$$a = \left[\frac{f_{-1}}{2} - f_0 + \frac{f_{+1}}{2} \right]; b = \left[\frac{f_{+1}}{2} - \frac{f_{-1}}{2} \right]; c = f_0.$$

Таким чином, у результаті обробки результатів чисельного експерименту, був отриманий аналітичний вираз, який наближено описує поведінку холодильної установки залежно від восьми параметрів, що варіюються. Це дозволило знайти оптимальний режим роботи холодильної машини, при якому досягається максимум холодопродуктивності.

На рис. 4 наведена гістограма, яка дає наочне уявлення про похибку отриманого аналітичного виразу для оцінки холодопродуктивності установки.

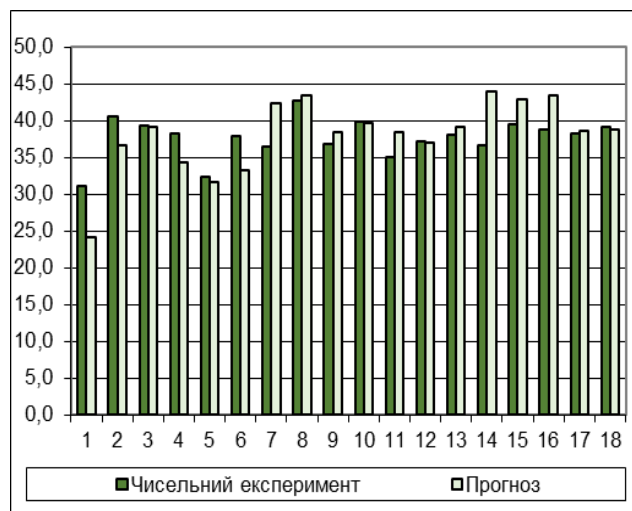


Рисунок 4 – Співставлення результатів розрахунку холодопродуктивності установки за отриманим аналітичним виразом і результатів чисельного експерименту.

Як видно з наведеної гістограми, узгодження між прогнозованими значеннями функції та її справжнім значенням є задовільним.

Максимальну холодопродуктивність установки, яку можна отримати при роботі з компресором TAG 2513Z, розраховуємо за формулою:

$$R_{\max} = \sum_8 \left[a_i \left(-\frac{b_i}{2a_i} \right) + b_i \left(-\frac{b_i}{2a_i} \right) \right], \quad (4)$$

де $(-b_i / 2a_i)$ – оптимальне значення i -го кодованого параметра, при якому досягається максимальна холодопродуктивність.

Прогнозоване значення холодопродуктивності установки вийшло рівним 54,6 Вт. Підстановка оптимальних параметрів роботи холодильної установки у програму COCO ChemSep дає значення холодопродуктивності 54,7 Вт. Це набагато більше ніж будь-яке із значень холодопродуктивності, отриманих у варіантних розрахунках (див. табл. 2).

У табл. 3 наведені результати оптимізації холодопродуктивності установки.

Таблиця 3 – Результати оптимізації холодопродуктивності установки на базі компресора TAG 2513Z

№	Найменування факторів	Натуральне значення	Кодоване значення
1	Тиск нагнітання компресора, бар	17,3 бар	1,64
2	Вміст азоту (молярна доля)	9,9 %	-0,15
3	Вміст метану (молярна доля)	48,6%	0,56
4	Вміст етану (молярна доля)	7,1%	-2,89
5	Вміст етану (молярна доля)	4,1%	0,1
6	Тиск всмоктування компресора,	2,4 бар	3,64
7	Температура на вході в сепаратор	289,1 К	0,15
8	Температура перед дроселем	134,2 К	0,16

4. Висновки

Шляхом обробки результатів багатофакторного чисельного експерименту були знайдені оптимальні параметри роботи холодильної установки на базі компресора TAG 2513Z. Оптимальний режим роботи установки виявився таким: тиск всмоктування – 2,4 бар, тиск нагнітання – 17,3 бар, концентрація робочої речовини: азот – 9,9 %, ме

тан – 48,6%, етан – 7,1%, пропан – 4,1%, ізобутан – 30,3%; температура на вході в фазовий сепаратор – 289,1 К, температура перед основним дроселем – 134,2 К. В такому режимі роботи досягається максимальна холодопродуктивність установки, яка дорівнює 54,7 Вт.

Особистий внесок авторів CRediT

Кравченко М.Б.: концептуалізація, методологія, дослідження, формальний аналіз, написання – оригінальний проект, адміністрування. **Кокул С.В.:** формальний аналіз, візуалізація, програмне забезпечення.

Література

1. **Boiarski, M., Brodianski, V., Longworth, R.** Retrospective of Mixed-Refrigerant technology and modern status of cryocoolers based on one-stage, oil-lubricated compressors // *Advances in Cryogenic Engineering*. – 1998. – Vol. 43. – P. 1701-1708.
2. **Little W. A.** Kleemenko cycle coolers: Low cost refrigeration at cryogenic temperatures // *Proceedings of IECCE17*. – 1998. – P. 1-9.
3. **Luo E.C., Gong M.Q., Zhou Y.** The research and development of cryogenic mixed-refrigerant Joule-Thomson cryocoolers in CL/CAS // *Advances in Cryogenic Engineering*. – 2000. – Vol. 45. – P. 299-306.
4. **Alexeev A., Quack H., Haberstroh Ch.** Further development of a mixed gas Joule-Thomson refrigerator // *Advances in Cryogenic Engineering*. – 1998. – Vol. 43B. – P. 1667-1674.
5. **Gong M.Q., et al.** Optimum composition calculation for multicomponent cryogenic mixture used in Joule-Thomson refrigerators // *Advances in Cryogenic Engineering*. – 2000. – Vol. 45. – P. 283-290.
6. Технічна характеристика компресора TAG 2513Z виробництва фірми Tecumseh. URL: <https://www.tecumseh.com/globalassets/media/north-america/files/marketing-brochures/tecumseh-ag-compressor-information-package-14-09-01-en.pdf> (дата звернення: 30.04.2022).
7. **Шенк Х.** Теорія інженерного експерименту – Москва: Мир, 1972. – 252 с.
8. **Чкалова О. М.** Основи наукових досліджень. – Київ: Вища школа, 1978. – 182 с.

Отримана в редакції 30.04.2022, прийнята до друку 16.05.2022

Optimization of the operation mode of the refrigerator with a zeotropic mixture refrigerant

Mykhailo Kravchenko^{1✉}, Serhii Kokuł²

¹⁻²Odesa National University of Technology, 1/3 Dvoryanska str., Odesa, 65082, Ukraine

✉ e-mail: ¹kravtchenko@i.ua

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-9310-2166>

Joule-Thomson cryorefrigerators operating on mixed working bodies have significant advantages over coolers using pure refrigerants. When optimizing the composition of zeotropic mixtures of refrigerants, it is necessary to take into account the specifics of the operation of positive displacement compressors. It is known that the delivery of a reciprocating compressor significantly depends on the compression ratio and the discharge pressure of the compressor. Therefore, optimizing the refrigerants composition at a fixed molar flow rate of the mixture, as is done in many works, is impractical. The article describes the method of optimizing the operation mode of refrigerator operating on a five-component zeotropic mixture working body. The maximum refrigerating capacity of the installation, which is built on the basis of a hermetic compressor TAG 2513Z, at a temperature of the cooling object of 120 K, was chosen as the target function. The purpose of the study is to create a relatively simple mathematical model of such a compressor, which should relate the suction and discharge pressures to the volume flow rate of the compressor. During the optimization, the following parameters were varied: discharge and suction pressures of the compressor, the composition of the five-component working mixture, as well as the temperature before throttle valve and the temperature at the entrance to the phase separator. As a result of processing the results of the numerical experiment, an analytical expression was obtained that roughly describes the operation of the refrigerator depending on the eight parameters that varied. This made it possible to find the optimal mode of operation of the refrigerating machine, in which maximum refrigerating efficiency is achieved. In the optimal operating mode of the refrigerating unit, the suction pressure is 2,4 bar, the discharge pressure is 17,3 bar, and with the optimal composition of the working substance achieves a maximum cooling capacity of 54,7 W.

Keywords: Kleemenko cycle; Mixed refrigerant; Compressor; Volume flow rate; Optimization; Cryorefrigerator.

References

1. Boiarski, M., Brodianski, V., Longworth, R. (1998) Retrospective of Mixed-Refrigerant technology and modern status of cryocoolers based on one-stage, oil-lubricated compressors. *Advances in Cryogenic Engineering*, 43, 1701-1708.
2. Little W. (1998) A. Kleemenko cycle coolers: Low cost refrigeration at cryogenic. *Proceedings of IECE17*, 1-9.
3. Luo, E.C., Gong, M.Q., Zhou, Y. (2000) The research and development of cryogenic mixed-refrigerant Joule-Thomson cryocoolers in CL/CAS. *Advances in Cryogenic Engineering*, 45, 299-306.
4. Alexeev, A., Quack, H., Haberstroh, Ch. (1998) Further development of a mixed gas Joule-Thomson refrigerator. *Advances in Cryogenic Engineering*, 43B, 1667-1674.
5. Gong, M.Q., et al. (2000) Optimum composition calculation for multicomponent cryogenic mixture used in Joule-Thomson refrigerators. *Advances in Cryogenic Engineering*, 45, 283-290.
6. Technical characteristics of the TAG 2513Z compressor manufactured by Tecumseh. Retrived 30 April 2022 from <https://www.tecumseh.com/globalassets/media/north-america/files/marketing-brochures/tecumseh-ag-compressor-information-package-14-09-01-en.pdf>
7. Shenk, H. (1972) Theory of an engineering experiment. *M.: Mir*, 252.
8. Chkalova, O.N. (1978) Foundations of scientific research. *Kyiv: Higher School*, 182.

Received 30 April 2022

Approved 16 May 2022

Available in Internet 30 June 2022