

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.5

Обґрунтування застосування робочих речовин «нового покоління» у випарниках холодильних і теплонасосних установок

К. М. Макєєва¹, О. О. Книш²^{1,2}Установа освіти «Гомельський державний технічний університет імені П.О. Сухого», пр. Жовтня, 48, м. Гомель, 246029, Республіка Білорусь

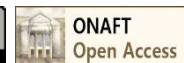
Наведено енергетичне та екологічне обґрунтування застосування озонобезпечних холодоагентів R1234yf, R513a і R448a в холодильних і теплонасосних установках. При виборі робочих речовин крім екологічних показників були враховані такі параметри, як холодильний коефіцієнт; допустимі по міцності конструкції машин, тиск конденсації і різниця тисків; питома об'ємна холодопродуктивність, величиною якої визначаються розміри компресора; відношення тисків, більш низькі значення якого обумовлюють більш високі робочі коефіцієнти компресора. Для обґрунтування можливості заміни холодоагентів R134a і R404a на холодоагенти «нового покоління» R1234yf, R513a і R448a зроблено порівняння циклів холодильних машин і циклів теплонасосних установок для зазначених холодоагентів на одних температурних рівнях. Для побудови циклів процесів, що характеризують роботу холодильних установок, були прийняті такі температури: температура кипіння $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура конденсації $30\text{ }^{\circ}\text{C}$; для побудови циклів процесів, що характеризують роботу теплонасосних установок: температура кипіння $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура конденсації $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. За вихідними даними були побудовані цикли холодильної та теплонасосної установок на $\lg p$ - h діаграмах для кожного досліджуваного холодоагенту. На рисунках наведені цикли для однокомпонентного холодоагенту R1234yf і сумішевих холодоагентів R448a і R513a. Пропоновані озонобезпечні холодоагенти практично не поступаються замінім холодоагентам за основними показниками ефективності роботи холодильної машини: питомої масової холодопродуктивності і холодильного коефіцієнта. При використанні пропонованих холодоагентів масова витрата зменшиться в 1,8 рази, споживана потужність теплонасосних і холодильних систем зменшиться в 1,4 рази, проте вартість даних холодоагентів у 10 разів більше вже використовуваних холодоагентів.

Ключові слова: Озонобезпечні холодоагенти «нового покоління»; Випарник; Холодильна установка; Теплонасосна установка; Холодильний коефіцієнт; Питома холодопродуктивність

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v55i4.1633>

© The Author(s) 2019. 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

Вибір енергетично ефективних і екологічно безпечних робочих речовин є важливим фактором при проектуванні різних видів холодильних і теплонасосних установок. В даний час існують різні підходи до оцінки ефективності застосування холодоагентів, що використовуються в даних установках. Аналіз літератури [1, 5, 7] дозволяє сфор-

мулювати основні вимоги, що пред'являються до робочих речовин теплонасосних і холодильних установок:

– об'ємна холодопродуктивність холодоагенту і теплота пароутворення повинні бути якомога більшими;

– тиск холодоагенту в кінці стиснення не повинен бути занадто високим, так як високі тиски призводять до ускладнення й обважнення конс-

трукції машини, роблять її небезпечною;

- тиск кипіння холодоагенту бажано мати вище атмосферного, так як при вакуумі в систему може засмоктуватися повітря, яке негативно впливає на роботу холодильної машини;

- температура затвердіння холодоагенту повинна бути низькою, так як вона обмежує можливість досягнення низьких температур, а критична температура холодоагенту повинна бути якомога вище;

- при нормальному атмосферному тиску холодоагент повинен мати достатньо низьку температуру кипіння, щоб при роботі холодильної машини не було розрідження в випарнику;

- густина і в'язкість холодоагенту повинні бути невеликими для скорочення гідравлічних втрат в трубопроводах і клапанах;

- для забезпечення високих теплопередавальних властивостей холодоагенту він повинен мати високі значення коефіцієнтів теплопровідності і тепловіддачі;

- для зменшення втрат тиску холодоагенту в трубопроводах і клапанах він повинен мати малу густину;

- бажано, щоб холодоагенти розчинялися у воді, щоб уникнути утворення крижаних пробок в дреселі і порушення роботи системи;

- важливою властивістю холодоагентів є їх розчинність в маслі;

- холодоагенти повинні бути нейтральними до металів (навіть у присутності вологи) і прокладним матеріалам, вони не повинні бути горючими і вибухонебезпечними, не повинні розкладатися при високих температурах;

- холодоагенти повинні володіти запахом, кольором або іншими властивостями, що дозволяють легко виявити витік.

- холодоагенти повинні бути нешкідливими для людини, вони не повинні бути отруйними, не повинні викликати задухи і роздратування слизових оболонок очей, носа і дихальних шляхів людини;

- холодоагенти повинні бути дешевими і доступними.

Різноманіття вимог, що пред'являються до холодоагентів, призводить до того, що знайти універсальну речовину, що відповідає всім цим вимогам, неможливо, тому холодоагент в різних випадках вибирається з урахуванням призначення, умов роботи і конструктивних особливостей холодильних і теплонасосних установок. В значній мірі пе-

рерахованим вище вимогам задовольняють озонобезпечні холодоагенти.

Метою даної роботи є енергетичне і екологічне обґрунтування застосування озонобезпечних холодоагентів R1234yf, R513a, R448a; порівняння циклів холодильних і теплонасосних установок для пропонуванних озонобезпечних холодоагентів R1234yf, R513a, R448a і замінних холодоагентів R134a і R404a.

2. Екологічне обґрунтування застосування холодоагентів

По впливу на озон холодоагенти діляться на 3 основні групи:

Група CFC (ХФУ) – хлорфторвуглеці. Вони є руйнівними для озонового шару. До групи ХФУ-холодоагентів відносяться холодоагенти R11, R12, R12B1, R13, R113, R114, R115.

Група HCFC (ГХФУ) – хлористоводневі фторвуглеці, дозволені до обмеженого застосування в перехідний період. До цієї групи належать холодоагенти R21, R22, R123, R124, R141b.

Група HFC (ГФУ) – гідрофторвуглеці. Вони не містять хлору і не реагують з озоном. До групи ГФУ-холодоагентів відносяться R23, R32, R125, R161, R1234yf, R152a [8, 9, 10].

У даній роботі досліджуються холодоагенти R1234yf, R513a і R448a в порівнянні з замінними холодоагентами R134a і R404a.

R513a – азеотропна суміш, призначена для заміни R134a. Головними перевагами холодоагенту є: значне зниження загальної заправки холодильних систем холодоагентом одночасно зі збереженням необхідного рівня безпеки, характерного для ГФУ; значне зменшення кількості потенційних витоків з холодильної системи; зменшення енергоспоживання в порівнянні з поширеною в даний час системою безпосереднього кипіння R134a.



■ 1 ■ 2

Рисунок 1 – Склад сумішевого холодоагенту R513a: 1 – R134a (44%), 2 – R1234yf (56%)

R448a – зеотропна суміш, призначена для заміни R404a. Розчинна в синтетичних маслах. При використанні холодоагенту в існуючих системах, слід брати до уваги температурний глайд від 5 до 6 К, так як це впливає на продуктивність випарника і конденсатора.

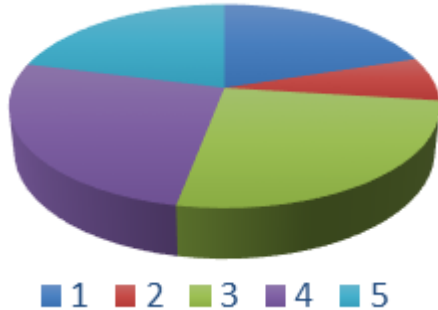


Рисунок 2 – Склад сумішевого холодоагенту R448a: 1 – R1234yf (20%), 2 – R1234ez (7%), 3 – R32 (26%), 4 – R125 (26%), 5 – R134a (21%)

R1234yf – прозорий, безбарвний, скраплений

під тиском газ, нетоксичний. Класифікується як слабозаймистий, проте випробування показали, що цей газ не займається в звичайних умовах. Розпадається на нешкідливі компоненти і зникає з атмосфери протягом 11 днів на відміну від холодоагенту R134a, який залишається в навколишньому середовищі близько 13 років [8-10].

3. Енергетичне обґрунтування застосування холодоагентів

При виборі робочої речовини крім екологічних показників беруть до уваги: холодильний коефіцієнт ε ; допустимі по міцності конструкції машин, тиск конденсації p_k і різницю тисків ($p_k - p_0$); питому об'ємну холодопродуктивність q_v , величиною якої визначаються розміри компресора; відношення тисків $\pi = p_k / p_0$, більш низькі значення якого обумовлюють більш високі робочі коефіцієнти компресора.

Таблиця 1 – Екологічні показники досліджуваних холодоагентів [6]

Показники	R513a	R134a	R404a	R1234yf	R448a
Клас безпеки (стандарт ASHRAE* 34)	A1	A1	A1	A2L	A1
ODP	0	0	0	0	0
GWP AR4	600	1430	3922	4	1273
COP, %	108	108	100	107	108

Для обґрунтування можливості заміни холодоагентів R134a і R404a на холодоагенти «нового покоління» R1234yf, R513a і R448a зроблено порівняння циклів холодильних машин (ХМ) і циклів теплонасосних установок (ТНУ) для зазначених холодоагентів на одних температурних рівнях [2-5, 7].

Вихідні дані:

– для побудови циклів процесів, що характеризують роботу холодильних установок, були прийняті наступні температури: температура кипіння $-15\text{ }^\circ\text{C}$, температура конденсації $30\text{ }^\circ\text{C}$;

– для побудови циклів процесів, що характеризують роботу теплонасосних установок: температура кипіння $5\text{ }^\circ\text{C}$, температура конденсації $40\text{ }^\circ\text{C}$.

Таблиця 2 – Теплофізичні показники досліджуваних холодоагентів

[1]Показники	R513a	R134a	R404a	R1234yf	R448a
Молекулярна маса, г/моль	108,4	102	97,6	114,04	86,3
Температура кипіння при 0,1013 МПа, $^\circ\text{C}$	-28	-26,1	-46,3	-29,49	-46,12
Критична температура, $^\circ\text{C}$	96,5	101	72	94,7	82,68
Критичний тиск, МПа	3,766	4,07	3,78	3,382	4,595
Критична густина, кг/м^3	490,89	512	484,5	476	477
Прихована теплота пароутворення при температурі кипіння, кДж/кг	192,2	215,9-217,1	175,28	195,4	241,48
Питома теплоємність при $25\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$: рідина / пара при тиску 0,1013 МПа	1,406 / 0,822	1,46 / 0,858	1,502 / 0,871	1,383 / 0,905	1,555 / 0,85
Густина насиченої пари при температурі $25\text{ }^\circ\text{C}$, кг/м^3	35,4	5,28	5,3	5,98	4,703

Кінець таблиці 2

[1]Показники	R513a	R134a	R404a	R1234yf	R448a
Густина насиченої рідини при температурі 25 °С, кг/м ³	1140	1206	1010	1092	1097
Коефіцієнт теплопровідності при 25 °С, 10 ⁻³ Па·с:	0,0702	0,082	0,0746	0,064	0,081
рідини / пара при тиску 0,1013 МПа	0,0136	0,0145	0,012	0,014	0,014

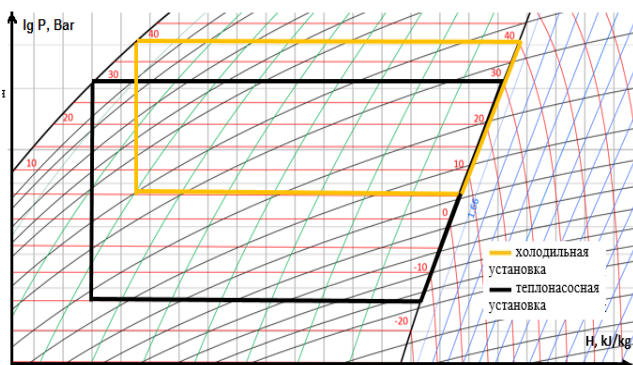


Рисунок 3 – Цикл холодильної та теплонасосної установки на прикладі холодоагенту R1234yf

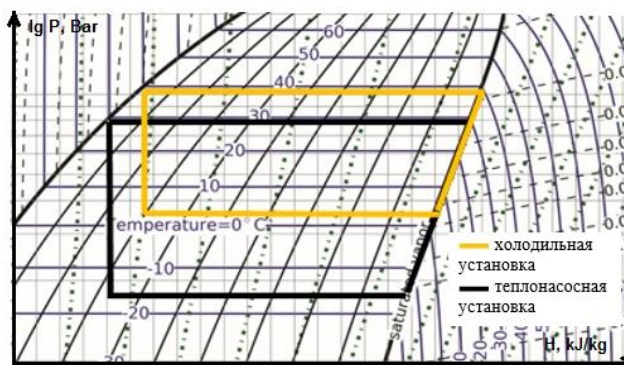


Рисунок 5 – Цикл холодильної та теплонасосної установки на прикладі холодоагенту R513a

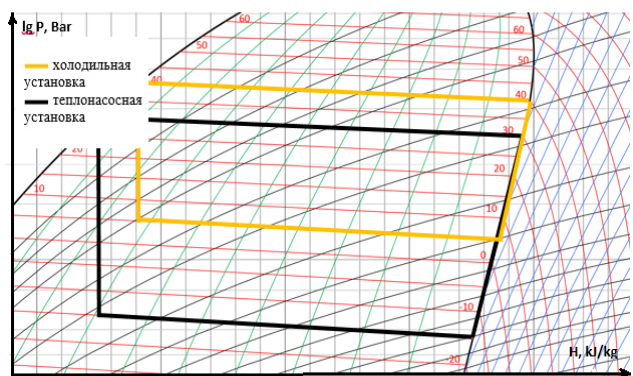


Рисунок 4 – Цикл холодильної та теплонасосної установки на прикладі холодоагенту R448a

За вихідними даними були побудовані цикли холодильної та теплонасосної установок на lg p-h діаграмах для кожного досліджуваного холодоагенту. На рисунках 3, 4 і 5 наведені цикли для однокомпонентного холодоагенту R1234yf і сумішевих холодоагентів R448a і R513a.

4. Висновок

Як випливає з таблиці 3 і гістограм (рисунок 6-7), запропоновані озонобезпечні холодоагенти практично не поступаються замінним холодоагентам за основними показниками ефективності роботи холодильної машини: питомої масової холодопродуктивності і холодильного коефіцієнта.

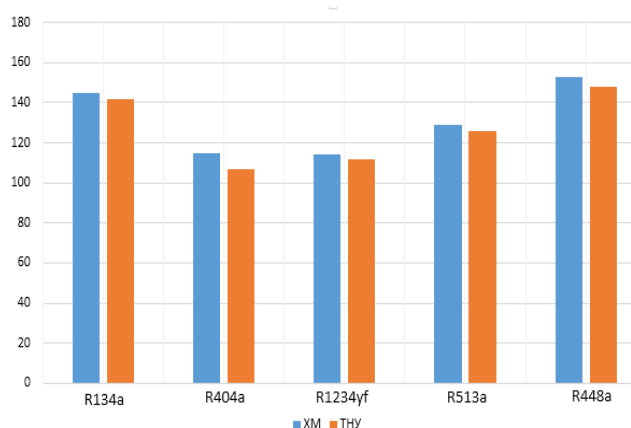


Рисунок 6 – Питома масова холодопродуктивність досліджуваних холодоагентів

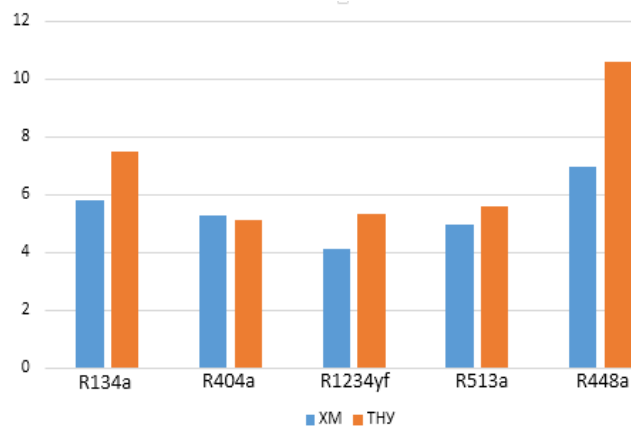


Рисунок 7 – Холодильні коефіцієнти досліджуваних холодоагентів

Таблиця 3 – Результати порівняння циклів холодильних і теплонасосних установок

Холодоагент	Питома масова холодопродуктивність q_0 , кДж/кг		Питома робота стиснення l_k , кДж/кг		Холодильний коефіцієнт, $\varepsilon = q_0 / l_k$		COP = $\varepsilon + 1$
	ХМ	ТНУ	ХМ	ТНУ	ХМ	ТНУ	
R134a	145	142	25	19	5,8	7,47	8,47
R404a	115	107	22	21	5,3	5,1	6,1
R1234yf	114	112	28	21	4,1	5,33	6,33
R513a	129	126	26	20	4,96	5,6	6,6
R448a	153	148	22	14	6,96	10,57	11,57

При використанні запропонованих холодоагентів масова витрата зменшиться в 1,8 рази, споживана потужність теплонасосних і холодильних систем зменшиться в 1,4 рази, проте вартість даних холодоагентів більше вже використовуваних холодоагентів.

Література

1. **Бабакин Б. С.** Хладагенты, масла, сервис холодильных систем / Б.С. Бабакин. Рязань: Узорочье. – 2003. – 470 с.
2. **Калнинь И. М.** Проблема выбора рабочего вещества для применения в высокотемпературных тепловых насосах / И.М. Калнинь, И.И. Малафеев // Холодильная техника. – 2014. – № 12. – С. 21-29.
3. **Калнинь И. М.** Тепловые насосы нового поколения, использующие экологически безопасные рабочие вещества / С.Б. Пустовалов, А.И. Савицкий // Холодильная техника. – 2007. – № 1.
4. **Калнинь И. М.** Требования к тестированию и представлению новых хладагентов / И.А. Афанасьева, В.И. Смыслов // Холодильная техника. – 1999. – № 2.
5. **Ротгольц Е. А. и др.** Выбор хладагента и системы холодильной установки. Холодильная техника. 2004. – №7. – С. 2–7.
6. Свойства хладагентов: ГОСТ Р ИСО 17584-2015 – Введ. 24.06.2015. – Москва: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: Всеросс. научн.-исслед. институт стандартизации материалов и технологий. – 2015. – 73 с.
7. **Сухих А. А.** Методика сравнения термодинамической эффективности циклов холодильных и теплонасосных установок / А.А. Сухих, И.С. Антаненкова // Вестник Международной академии холода. – 2012. – № 4. – С. 21-25.
8. Хладагенты. Обозначение и классификация безопасности. – ISO/TC 86/SC 8 N 134, ISO/CD 817: 2007. – Введ. 08.05.2007. – Международная организация по стандартизации (ИСО). – 2007.
9. **Цветков О. Б.** Хладагенты на посткиотском экологическом пространстве / О.Б. Цветков // Холодильная техника. – 2012. – № 1. – С. 70–72.
10. **Цветков О. Б.** Холодильные агенты. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2004. – 216 с.

Отримана в редакції 02.06.2019, прийнята до друку 02.07.2019

Justification of the use of "new generation" working substances in evaporators of refrigeration and heat pump plants

*E. Makeeva*¹, *O. Knysh*²

^{1,2}Educational institution "Gomel state technical University named after P. O. Sukhoi", 48 Oktyabrya Ave., Gomel, 246029, Republic of Belarus

✉ e-mail: ¹makeeva.ekaterina85@mail.ru

The energy and environmental justification of the use of ozone-safe refrigerants R1234yf, R513a and R448a in refrigeration and heat pump installations is given. If you select working substances in addition to environmental indicators were taken into account parameters such as refrigerating factor; allowable strength design machine the condensing pressure and pressure difference; specific volumetric refrigerating

effect, the value of which determines the size of the compressor, pressure ratio, lower values of which contribute to higher operating ratios of the compressor. In order to justify the possibility of replacing refrigerants R134a and R404a with "new generation" refrigerants R1234yf, R513a and R448a, a comparison of cycles of refrigeration machines and cycles of heat pump units for these refrigerants at the same temperature levels was made. To construct the cycles of processes characterizing the operation of refrigeration units, the following temperatures were adopted: boiling point -15°C , condensation temperature 30°C ; to construct the cycles of processes characterizing the operation of heat pump units: boiling point 5°C , condensation temperature 40°C . According to the initial data, cycles of refrigeration and heat pump units were constructed using lgp-h diagrams for each refrigerant under study. The figures show the cycles for the one-component refrigerant R1234yf and the mixed refrigerants R448a and R513a. The offered ozone-safe refrigerants practically do not concede to replaced refrigerants on the main indicators of efficiency of work of the refrigerating machine: specific mass refrigerating capacity and refrigerating coefficient. When using the proposed refrigerants, the mass consumption will be reduced by 1.8 times, the power consumption of heat pump and refrigeration systems will be reduced by 1.4 times, but the cost of these refrigerants is 10 times more than the already used refrigerants.

Key words: Ozone-safe refrigerants of "new generation"; Evaporator; Refrigeration unit; Heat pump unit; Refrigeration coefficient; Specific cooling capacity

References

1. Babakin, B. S. (2003) Khladagenty, masla, servis kholodilnykh sistem. Ryazan: Uzorochie, 470.
2. Kalnin, I. M. (2014) Problema vybora rabocheho veshhestva dlia primeneniia v vysokotemperaturnykh teplovykh nasosakh. *Kholodilnaya tekhnika*, 12, 21-29.
3. Kalnin, I. M. (2007) Teplovye nasosy novogo pokoleniia, ispolzuyushhie ekologicheski bezopasnye rabochie veshhestva. *Kholodilnaya tekhnika*, 1.
4. Kalnin, I. M. (1999) Trebovaniia k testirovaniu i predstavleniu novykh khladagentov *Kholodilnaya tekhnika*, 2.
5. Rotgolcz, E. A. et al. (2004) Vybor khladagenta i sistemy kholodilnoi ustanovki. *Kholodilnaya tekhnika*, 7, 2-7.
6. Svoistva khladagentov: GOST R ISO 17584-2015. Vved. 24.06.2015. Moskva: Federalnoe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii: Vseross. nauchn.-issled. institut standartizatsii materialov i tekhnologii, 73.
7. Sukhikh, A. A. (2012) Metodika sravneniia termodinamicheskoi effektivnosti tsiklov kholodilnykh i teplonasosnykh ustanovok. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*, 4, 21-25.
8. Khladagenty. Oboznachenie i klassifikatsia bezopasnosti. ISO/TC 86/SC 8 N 134, ISO/CD 817: 2007. Vved. 08.05.2007. *Mezhdunarodnaia organizatsiia po standartizatsii (ISO)*.
9. Tsvetkov, O. B. (2012) Khladagenty na postkiotskom ekologicheskom prostranstve. *Kholodilnaya tekhnika*, 1, 70-72.
10. Tsvetkov, O. B. (2004) Kholodilnye agenty. SPB.: SPbGUNIPT, 216.

Received 02 June 2019

Approved 02 July 2019

Available in Internet 05 September 2019