УДК 621.527-047.44

doi: 10.32620/aktt.2021.4.06

А. М. РАДЧЕНКО¹, Д. В. КОНОВАЛОВ², С. Г. ФОРДУЙ³,
Р. М. РАДЧЕНКО¹, С. А. КАНТОР⁴, В. П. ХАЛДОБІН²

¹ Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна,

² Херсонська філія Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова, Україна,

³ PepsiCo, Inc., CTS ESSA, Київ, Україна,

⁴ ПАТ "Завод "Екватор", Україна.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЖЕКТОРНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН НА РІЗНИХ ХОЛОДОАГЕНТАХ

Сучасні тепловикористовуючі ежекторні холодильні машини, які застосовуються в системах утилізації теплоти енергетичних установок на базі газотурбінних двигунів і двигунів внутрішнього згоряння, мають ряд переваг в порівнянні з абсорбційними холодильними машинами: менші габарити та маса; можливість отримувати більш низькі значення температур. Однак, за енергетичною ефективністю вони поступаються, при цьому тепловий коефіцієнт значно менше і може складати 0,2...0,4. Ефективність таких холодильних машин значною мірою залежить від вибору робочого тіла (холодоагенту). Звідси виникає необхідність в виборі такого холодоагенту, який забезпечив би максимальний тепловий коефіцієнт, а значить і максимальну ефективність утилізації теплоти. Зважаючи на порівняно низьку ефективність ежекторної холодильної машини, пошук робочого тіла, яке забезпечить, з одного боку, більш високі показники теплового коефіцієнту, а з іншого високу екологічність, є одним з перспективних напрямів розвитку технологій утилізації теплоти в енергоустановках. У дослідженні використано розроблений авторами програмний комплекс для розрахунку холодильних циклів тепловикористовуючих холодильних машин із врахуванням властивостей ряду сучасних холодоагентів, характеристик ежектора, а також основних теплообмінних апаратів (конденсатора, випарника, генератора пари). В роботі було проаналізовано ефективність ежекторних холодильних машин при роботі на наступних робочих тілах: R142b, R134a, R600, R600a, R1234ze(E), R1233zd(E), R1234yf, R227ea, R236fa, R245fa. Найбільші значення теплових коефіцієнтів мають R142b, R600, R600a, R245fa. Встановлено, що найбільш вигідним з точки зору екологічності (ODP, GWP) та енергетичної ефективності є використання холодоагенту R245fa, який має в діапазоні температур конденсації 25...35 °C і кипіння у випарнику 0...15 °C тепловий коефіцієнт 0,40...1,03.

Ключові слова: ежектор; холодильна машина; утилізація теплоти; тригенерація; низькокипляче робоче тіло.

Вступ

Одним з найбільш ефективних напрямків підвищення паливної ефективності енергетичних установок на базі газотурбінних двигунів (ГТД) і двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) є комплексна утилізація високо- та низькопотенційної теплоти [1]. Особливо цікавим з цієї точки зору є застосування тепловикористовуючих холодильних машин в установках комбінованого виробництва енергії (когенерація, тригенерація) як для суднової так і для стаціонарної енергетики [2]. Слід відмітити, що холодильні машини такого типу можуть забезпечувати виробництво холоду різного призначення, наприклад, для систем технологічного або комфортного кондиціонування повітря з одного боку [3], а також для енергетичних потреб теплового двигуна (ГТД або ДВЗ) енергетич-

ної установки (охолодження повітря на вході, проміжне охолодження циклового повітря, охолодження наддувного повітря та інш.) [4]. При цьому такі машини можуть використовувати (утілізувати) низькопотенційну теплову енергію відхідних або рециркуляційних газів [5], наддувного повітря [6], систем охолодження, масла [7], вторинних джерел енергії технологічного виробництва [8] та інш.

Останнім часом, в якості тепловикористовуючих, в тригенераційних і когенераційних установках, застосовують абсорбційні та ежекторні холодильні машини (ЕХМ) [9]. Слід зазначити, що сучасні ЕХМ мають ряд переваг в порівнянні з абсорбційними холодильними машинами: менші габарити та маса; можливість отримувати більш низькі значення температур (нижче +5 °C). Однак, за енергетичною ефективністю вони поступаються, при цьому тепловий коефіцієнт ЕХМ значно менше і може складати

$\zeta = 0,2 \dots 0,4$ [10]. Саме це впливає на сучасний розвиток технологій на основі ЕХМ, ефективність, яких значною мірою залежить від вибору робочого тіла (холодоагенту) [11]. Звідси виникає необхідність в виборі такого холодоагенту, який забезпечив би максимальний тепловий коефіцієнт, а значить і максимальну ефективність утилізації теплоти в установках комбінованого виробництва енергії.

1. Аналіз проблеми і постановка мети та задач дослідження

Питання енергоспоживання холодильних машин вельми актуальне, звідси і підвищений інтерес до холодильних машин, які використовують низькопотенційну вторинну теплоту. Одними з найбільш перспективних є ЕХМ на низькокиплячих робочих тілах (НРТ) – холодоагентах [12].

Систематичні дослідження ЕХМ на НРТ почали проводитися ще з 50-60-х років [13]. При цьому дослідження з метою підвищення енергетичної ефективності ЕХМ здійснювалося в наступних напрямках [14]:

- 1) вибору найбільш ефективного робочого тіла;
- 2) вдосконалення геометрії проточної частини ежектора;
- 3) розробки схемо-конструктивних рішень ЕХМ;
- 4) виключення з ЕХМ елементів, які споживають електроенергію (холодильних насосів).

З початку 80-х років холодоагенти на основі хлорфторвуглецю та гідрохлорфторвуглецю зайняли домінуюче положення в холодильній промисловості та їх розглядали як робочі тіла, які мають тільки переваги в порівнянні із іншими типами холодоагентів [12, 14]. Однак, дослідження впливу цих холодоагентів на навколишнє середовище показали, що при їх використанні є ряд глобальних проблем, а саме вплив на підвищення парникового ефекту та руйнування озонового шару.

Кроком до вирішенні проблеми озонового шару стало підписання провідними державами світу Монреальського протоколу 1987 р., який забороняє використання та експлуатацію цілого ряду холодоагентів на основі хлорфтор- і гідрохлорфторвуглецю [15]. Рішення Конвенції про скорочення емісії парникових газів, яке було підписане в Кіото у 1997 р. також забороняє використання ряду хладонів [15]. Для заміни цих хладонів розроблюються та використовуються на сьогоднішній день альтернативні озонобезпечні одно- та багатокомпонентні холодоагенти (R134a, R401A, R402A, R407C та інш.).

Теоретичне та експериментальне дослідження ЕХМ проводилося з використанням цілого ряду холодоагентів R11, R12, R21, R40, R113, R114, R123,

R141b, R142b, R152a, R290, RC318, R500, R717 [13, 15]. Слід зазначити, що останнім часом вибору найбільш ефективного робочого тіла для холодильних машин взагалі приділяється дуже багато уваги. Це вкрай важливо з огляду не тільки на термодинамічні та теплофізичні, а й особливо екологічні та експлуатаційні характеристики холодоагентів. Також, зважаючи на порівняно низьку ефективність ЕХМ, пошук робочого тіла, яке забезпечить, з одного боку, більш високі показники теплового коефіцієнту, а з іншого високу екологічність, є одним з перспективних напрямів розвитку технологій утилізації теплоти енергетичних установок.

Мета дослідження – аналіз ефективності застосування різних холодоагентів в тепловикористовуючих ежекторних холодильних машинах.

2. Методологія дослідження

Основними елементами ЕХМ є конденсатор, генератор пари, випарник і ежектор. Принципова схема та цикл традиційної ЕХМ на НРТ наведена на (рис. 1). ЕХМ працює наступним чином: ежектор всмоктує пару з випарника, використовуючи енергію робочої пари високого тиску (точка 6), що надходить із генератора пари і розширюється в його соплі до тиску (точка 7) дещо меншого, ніж тиск пари на виході з випарника (точка 4), та стискає її до тиску конденсації (точка 1): процеси 3–4 та 5–6 – кипіння (з можливим перегрівом пари) у випарнику та генераторі робочої пари високого тиску; 6–7 – розширення робочої пари в соплі ежектора; 4–8 – зниження тиску пари, всмоктуваної з випарника, у приймальній камері ежектора; 8–9 та 7–9 – змішування холодної пари з випарника та пари на виході з сопла ежектора; 9–1 – підвищення тиску парової суміші в камері змішування та в дифузорі ежектора. Стиснена ежектором пара конденсується в конденсаторі (процес 1–2). Рідкий холодоагент розділяється на два потоки: перший дроселюється у дросельному вентилі (процес 2–3) та випаровується у випарнику (процес 3–4), другий – стискується в насосі до високого тиску (процес 2–5) та випаровується в генераторі (процес 5–6).

Головним елементом ЕХМ є ежектор – струминний компресор із геометричними характеристиками, оптимальними лише на одному – розрахунковому режимі. Але як показує практика експлуатації, ЕХМ у більшості випадків працюють на різних температурних режимах. Ежектор – струминний апарат, в якому відбувається змішування та обмін енергією двох потоків різного тиску з утворенням змішаного потоку з проміжним тиском.

Основною характеристикою ежектора є коефіцієнт ежекції:

$$U = \frac{G_0}{G_r}, \quad (1)$$

де G_0 , G_r – витрата холодоагенту через випарник, і генератор пари.

$$Q_0 = G_0 (i_1 - i_6); \quad (2)$$

$$Q_k = G_k (i_4 - i_5); \quad (3)$$

$$Q_r = G_r (i_8 - i_7), \quad (4)$$

де G_k – витрата холодоагенту через конденсатор;

$i_1, i_4, i_5, i_6, i_7, i_8$ – ентальпії пари в характерних точках циклу.

Ефективність ЕХМ розраховувалася за тепловим коефіцієнтом:

$$\zeta = \frac{Q_0}{Q_r} = \frac{G_0 (i_1 - i_6)}{G_r (i_8 - i_7)} = U \frac{(i_1 - i_6)}{(i_8 - i_7)}. \quad (5)$$

Рис. 1. Схема (а) і цикл (б) ЕХМ:
1 – ежектор; 2 – конденсатор; 3 – дросель;
4 – повітроохолоджувач; 5 – насос;
6 – генератор пари

Рівняння теплового балансу ЕХМ по холодоагенту для повітроохолоджувача Q_0 , конденсатора Q_k та генератора Q_r :

Аналіз застосування холодоагентів в ЕХМ здійснювався за наступних умов: температура конденсації – $t_k = 25 \dots 35^\circ\text{C}$; температура кипіння у випарнику $t_0 = 0 \dots 15^\circ\text{C}$; температура кипіння в генераторі пари – $t_r = 80 \dots 120^\circ\text{C}$ (у випадку перевищення температури вище критичної приймалася найбільша досяжна для забезпечення кипіння в теплообміннику).

При виборі холодоагенту для використання в ЕХМ враховувалися [15]: нормальна температура кипіння t_s ; критична температура $t_{кр}$ і критичний тиск $P_{кр}$; токсичність відповідно до стандарту TLV-TWA; озоннебезпечність – Ozone Depletion Potential (ODP); вплив на підвищення парникового ефекту – Global Warming Potential (GWP). Було обрано ряд холодоагентів (табл. 1), які є перспективним щодо застосування в ЕХМ, в тому числі традиційний для ЕХМ холодоагент R142b.

У дослідженні використано розроблений авторами програмний комплекс для розрахунку циклів ЕХМ із врахуванням властивостей ряду сучасних холодоагентів, характеристик ежектора, а також основних теплообмінних апаратів (конденсатора, випарника, генератора пари) [8].

Таблиця 1

Холодоагенти для застосування в тепловикористовуючих ежекторних холодильних машинах

Холодоагент	$t_s, ^\circ\text{C}$	$t_{кр}, ^\circ\text{C}$	$P_{кр}, 10^5 \text{ Па}$	Показник адиабати k	$R^*, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$	TLV-TWA [%]	ODP	GWP ₁₀₀
R142b	-9,1	137,1	40,6	1,30	110	1000	0,060	2220
R134a	-17,6	119,0	46,4	1,30	108	1000	0	1110
R600	-0,5	152,0	38,0	1,11	252	1000	0	20
R600a	-11,7	134,7	36,3	1,11	232	1000	0	20
R1234ze(E)	-19,0	109,4	36,4	1,20	168	1000	0	6
R1233zd(E)	18,3	166,5	36,2	1,20	99	0,8	0,0005	1
R1234yf	-29,5	94,7	33,8	1,32	227	0,0005	0	4
R227ea	-16,3	101,8	29,3	1,24	130	2,58	0	3350
R236fa	-1,4	124,9	32,0	1,23	122	1000	0	20
R245fa	15,1	154,0	36,5	1,24	122	0,3	0	1030

Примітки: * – приведено до температури конденсації $t_k = 35^\circ\text{C}$.

3. Результати дослідження

Аналіз ефективності EXM при використанні ряду холодоагентів (рис. 2) показує, що при підвищенні температури кипіння в випарнику t_0 та температурі кипіння в генераторі t_r , і навпаки, при зменшенні температури конденсації t_k тепловий коефіцієнт ζ зростає. Слід зазначити, що максимальні температури в генераторі приймалися $t_r = 120^\circ\text{C}$, але для холодоагентів R134a, R1234ze(E), R1234yf, R227ea і R236fa значення t_r приймалися менше 120°C , відповідно до значення критичної температури.

Розглядаючи залежності теплового коефіцієнта відповідно до кожного з холодоагентів в діапазоні температур, які характерні для режиму кондиціювання повітря ($t_0 = 0 \dots 15^\circ\text{C}$) та при максимальній температурі кипіння в генераторі пари і температурі конденсації $t_k = 25^\circ\text{C}$, можна констатувати наступне.

- R142b – $\zeta = 0,40 \dots 1,02$ (рис. 2, а);
- R134a – $\zeta = 0,32 \dots 0,80$ (рис. 2, б);
- R600 – $\zeta = 0,38 \dots 1,22$ (рис. 2, в);
- R600a – $\zeta = 0,40 \dots 1,15$ (рис. 2, г);
- R1234ze(E) – $\zeta = 0,22 \dots 0,60$ (рис. 2, д);
- R1233zd(E) – $\zeta = 0,20 \dots 0,80$ (рис. 2, е);
- R1234yf – $\zeta = 0,28 \dots 0,72$ (рис. 2, ж);
- R227ea – $\zeta = 0,25 \dots 0,68$ (рис. 2, з);
- R236fa – $\zeta = 0,26 \dots 0,71$ (рис. 2, і);
- R245fa – $\zeta = 0,40 \dots 1,03$ (рис. 2, к).

Слід зазначити, що найбільші значення теплових коефіцієнтів мають R142b, R600, R600a, R245fa. Однак, традиційний R142b має незадовільні значення ODP і GWP в порівнянні з іншими холодоагентами (див. табл. 1). Природні R600 (бутан) і R600a (ізобутан) мають обмеження при експлуатації, що пов'язано із вибухо- та пожежонебезпекою при їх експлуатації. Зважаючи на це, можна рекомендувати до використання новий холодоагент R245fa, який при збільшенні температури конденсації до $t_k = 35^\circ\text{C}$

(більш складні умови експлуатації в тропіках) має тепловий коефіцієнт – $\zeta = 0,2793$ ($t_0 = +7^\circ\text{C}$).

Висновки

Обґрунтовано необхідність вибору холодоагентів для тепловикористовуючих ежекторних холодильних машин, які б відповідали високим тепловим коефіцієнтам та екологічним вимогам, щодо сучасних умов експлуатації у складі систем утилізації теплоти енергетичних установок на базі ГТД і ДВЗ.

Встановлено, що найбільш вигідним з точки зору екологічності (ODP, GWP) та енергетичної ефективності є використання в EXM холодоагенту R245fa, який має в діапазоні температур конденсації $t_k = 25 \dots 35^\circ\text{C}$ і кипіння у випарнику $t_0 = 0 \dots 15^\circ\text{C}$ тепловий коефіцієнт $\zeta = 0,40 \dots 1,03$.

Література

1. *Monitoring the efficiency of cooling air at the inlet of gas engine in integrated energy system [Text] / A. Radchenko, I.-C. Scurtu, M. Radchenko, S. Forduy, A. Zubarev // Thermal Science. – 2020. DOI: 10.2298/TSCI200711344R.*
2. *Monitoring the Fuel Efficiency of Gas Engine in Integrated Energy System [Text] / A. Radchenko, D. Mikielewicz, S. Forduy, M. Radchenko, A. Zubarev // In: Nechyporuk M., et al. (eds.) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. AISC. – 2020. – Vol. 1113. – P. 361-370. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_31.*
3. *Increasing the Operation Efficiency of Air Conditioning System for Integrated Power Plant on the Base of Its Monitoring [Text] / E. Trushliakov, A. Radchenko, S. Forduy, A. Zubarev, A. Hrych // In: Nechyporuk M., et al. (eds.) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. AISC. – 2020. – Vol. 1113. – P. 351-360. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_30.*

Рис. 2. Залежності теплового коефіцієнта EXM ζ від температури кипіння в випарнику t_0 при різних температурах конденсації t_k для ряду холодоагентів:

- а), в), г), е), к) – — — — — $t_r = 80^\circ\text{C}$; — — — — — $t_r = 120^\circ\text{C}$; в), з) – — — — — $t_r = 80^\circ\text{C}$; — — — — — $t_r = 90^\circ\text{C}$;
 д) – — — — — $t_r = 80^\circ\text{C}$; — — — — — $t_r = 85^\circ\text{C}$; ж) – — — — — $t_r = 80^\circ\text{C}$; і) – — — — — $t_r = 80^\circ\text{C}$; — — — — — $t_r = 100^\circ\text{C}$

Рис. 2. Залежності теплового коефіцієнта ЕХМ ζ від температури кипіння в випарнику t_0

4. Konovalov, D. Efficiency Analysis of Gas Turbine Plant Cycles with Water Injection by the Aerothermopressor [Text] / D. Konovalov, H. Kobalava // In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Springer, Cham, 2019. – P. 581-591.

5. Improvement of Characteristics of Water-Fuel Rotary Cup Atomizer in a Boiler [Text] / V. Kornienko, R. Radchenko, D. Mikielewicz, M. Pyrysunko, A. Andreev // In: Tonkonogiy, V. et al. (eds.) *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. LNME*. – 2021. – P. 664-674. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_64.

6. Efficient ship engine cyclic air cooling by turboexpander chiller for tropical climatic conditions [Text] / M. Radchenko, D. Mikielewicz, A. Andreev, S. Vanyeyev, O. Savenkov // In: Nechyporuk M., et al. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering* – 2020. LNNS. – 2021. – Vol. 188. – P. 498-507. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_42.

7. Innovative turbine intake air cooling systems and their rational designing [Text] / A. Radchenko, E. Trushliakov, K. Kosowski, D. Mikielewicz, M. Radchenko // *Energies*. – 2020. – Vol. 13, no. 23. Article Id: 6201. DOI: 10.3390/en13236201.

8. Optimal Sizing of the Evaporation Chamber in the Low-Flow Aerothermopressor for a Combustion Engine [Text] / D. Konovalov, H. Kobalava, M. Radchenko, V. Sviridov, I.C. Scurtu // In: Tonkonogiy V. et al. (eds.) *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. LNME*. – 2021. – P. 654-663. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_63.

9. Підвищення ефективності охолодження повітря на вході ГТД холодильними машинами шляхом акумуляції холоду [Текст] / А. М. Радченко, Б. С. Портной, С. А. Кантор, О. І. Прядко, І. В. Калініченко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – № 4(164). – С. 22-27. DOI: 10.32620/akt.2020.4.03.

10. Methods to determine a design cooling capacity of ambient air conditioning systems in climatic conditions of Ukraine and Kazakhstan [Text] / N. Radchenko, E. Trushliakov, A. Radchenko, A. Tsoy, O. Shchesiuk // *AIP Conference Proceedings* 2285, 030074. – 2020. DOI: 10.1063/5.0026790.

11. Elbel, S. Review of recent developments in advanced ejector technology [Text] / S. Elbel, N. Lawrence // *International Journal of Refrigeration*. – 2016. – Vol. 62. – P. 1-18.

12. Lawrence, N. Experimental investigation of a two-phase ejector cycle suitable for use with low-pressure refrigerants R134a and R1234yf [Text] / N. Lawrence, S. Elbel // *International Journal of Refrigeration*. – 2014. – Vol. 38. – P. 310-322.

13. Elbel, S. Historical and present developments of ejector refrigeration systems with emphasis on transcritical carbon dioxide airconditioning [Text] / S. Elbel // *International Journal of Refrigeration*. – 2011. – № 34(7). – P. 1545-1561.

14. Investigations of prototype ejection refrigeration system driven by low grade heat [Text] / D. Butrymowicz, J. Gagan, K. Śmierciew, M. Łukaszuk, A. Dudar, A. Pawluczuk, A. Łapiński, A. Kuryłowicz // *HTRSE-2018, E3S Web of Conferences* 70. 03002. – 2018. – 7 p.

15. Железный, В. П. Рабочие тела пароконденсаторных холодильных машин: свойства, анализ, применение [Текст] : моногр. / В. П. Железный, Ю. В. Семенюк. – Одесса : Феникс, 2012. – 420 с.

References

1. Radchenko, A., Scurtu, I-C., Radchenko, M., Forduy, S., Zubarev, A. Monitoring the efficiency of cooling air at the inlet of gas engine in integrated energy system. *Thermal Science*, 2020. DOI: 10.2298/TSCI200711344R.

2. Radchenko, A., Mikielewicz, D., Forduy, S., Radchenko, M., Zubarev, A. Monitoring the Fuel Efficiency of Gas Engine in Integrated Energy System. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering (ICTM 2019). AISC*, 2020, vol. 1113, pp. 361-370. Doi: 10.1007/978-3-030-37618-5_31.

3. Trushliakov, E., Radchenko, A., Forduy, S., Zubarev, A., Hrych, A. Increasing the Operation Efficiency of Air Conditioning System for Integrated Power Plant on the Base of Its Monitoring. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. AISC*, 2020, vol. 1113, pp. 351-360. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_30.

4. Konovalov, D., Kobalava, H. Efficiency Analysis of Gas Turbine Plant Cycles with Water Injection by the Aerothermopressor. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. LNME*, Springer, Cham, 2019, pp. 581-591.

5. Kornienko, V., Radchenko, R., Mikielewicz, D., Pyrysunko, M., Andreev, A.: Improvement of Characteristics of Water-Fuel Rotary Cup Atomizer in a Boiler. *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. LNME*, 2021, pp. 664-674. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_64.

6. Radchenko, M., Mikielewicz, D., Andreev, A., Vanyeyev, S., Savenkov O. Efficient ship engine cyclic air cooling by turboexpander chiller for tropical climatic conditions. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering*, LNNS, 2021, vol. 188, pp. 498-507. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_42.

7. Radchenko, A., Trushliakov, E., Kosowski, K., Mikielewicz, D., Radchenko M. Innovative turbine intake air cooling systems and their rational designing. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 23. Articles Id: 6201. DOI: 10.3390/en13236201.

8. Konovalov, D., Kobalava, H., Radchenko, M., Sviridov, V., Scurtu, I.C. Optimal Sizing of the Evaporation Chamber in the Low-Flow Aerothermopressor for a Combustion Engine. *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. LNME*, 2021, pp. 654-663. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_63.

9. Radchenko, A.M., Portnoi, B.S., Kantor, S.A., Priadko, O.I. Kalinichenko, I.V. Pidvyshchennya efektyvnosti okholodzhennya povitrya na vkhodi HTD kholodyl'nymy mashynamy shlyakhom akumulatsiyi kholodu [Increasing the efficiency of the air cooling at the gte inlet by chillers with accumulation of cold]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 4(164), pp. 22-27, DOI: 10.32620/aktt.2020.4.03.

10. Radchenko, N., Trushliakov, E., Radchenko, A., Tsoy, A., Shchesiuk, O. Methods to determine a design cooling capacity of ambient air conditioning systems in climatic conditions of Ukraine and Kazakhstan. *AIP Conference Proceedings* 2285, 030074, 2020. DOI: 10.1063/5.0026790.

11. Elbel, S., Lawrence, N. Review of recent developments in advanced ejector technology. *International Journal of Refrigeration*, 2016, vol. 62, pp. 1-18.

12. Lawrence, N., Elbel, S. Experimental investigation of a two-phase ejector cycle suitable for use with

low-pressure refrigerants R134a and R1234yf. *International Journal of Refrigeration*, 2014, vol. 38, pp. 310-322.

13. Elbel, S. Historical and present developments of ejector refrigeration systems with emphasis on transcritical carbon dioxide airconditioning. *International Journal of Refrigeration*, 2011, no. 34(7), pp. 1545-1561.

14. Butrymowicz, D., Gagan, J., Śmierciew, K., Łukaszuk, M., Dudar, A., Pawluczuk, A., Łapiński, A., Kuryłowicz, A. Investigations of prototype ejection refrigeration system driven by low grade heat. *HTRSE-2018, E3S Web of Conferences* 70, 2018. 7 p.

15. Zhelezny, V. P., Semenyuk, Y. V. Rabochie tela parokompresornyh holodil'nyh mashin: svoystva, analiz, primeneniye [Working bodies of steam-compressor refrigerating machines: proper-ties, analysis, application: monograph]. Odessa, Phoenix Publ., 2012. 420 p.

Надійшла до редакції 15.05.2021, розглянута на редколегії 09.08.2021

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЖЕКТОРНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН НА РАЗНЫХ ХЛАДАГЕНТАХ

А. Н. Радченко, Д. В. Коновалов, С. Г. Фордуй, Р. Н. Радченко, С. А. Кантор, В. П. Халдобин

Современные теплоиспользующие эжекторные холодильные машины, которые применяются в системах утилизации теплоты энергетических установок на базе газотурбинных двигателей и двигателей внутреннего сгорания, имеют ряд преимуществ по сравнению с абсорбционными холодильными машинами: меньшие габариты и масса; возможность получать более низкие значения температур. Однако, по энергетической эффективности они уступают, при этом тепловой коэффициент значительно меньше и может составлять 0,2...0,4. Эффективность таких холодильных машин в значительной степени зависит от выбора рабочего тела (хладагента). Отсюда возникает необходимость в выборе такого хладагента, который обеспечил бы максимальный тепловой коэффициент, а значит и максимальную эффективность утилизации теплоты. Несмотря на сравнительно низкую эффективность эжекторной холодильной машины, поиск рабочего тела, которое обеспечит, с одной стороны, более высокие показатели теплового коэффициента, а с другой высокую экологичность, является одним из перспективных направлений развития технологий утилизации теплоты в энергоустановках. В исследовании использован разработанный авторами программный комплекс для расчета холодильных циклов теплоиспользующих холодильных машин с учетом свойств ряда современных хладагентов, характеристик эжектора, а также основных теплообменных аппаратов (конденсатора, испарителя, генератора пара). В работе была проанализирована эффективность эжекторных холодильных машин при работе на следующих рабочих телах: R142b, R134a, R600, R600a, R1234ze(E), R1233zd(E), R1234yf, R227ea, R236fa, R245fa. Наибольшие значения тепловых коэффициентов имеют R142b, R600, R600a, R245fa. Установлено, что наиболее выгодным с точки зрения экологичности (ODP, GWP) и энергетической эффективности является хладагент R245fa, который имеет в диапазоне температур конденсации 25...35 °C и кипения в испарителе 0...15 °C тепловой коэффициент 0,40...1,03.

Ключевые слова: эжектор; холодильная машина; утилизация теплоты; тригенерация; низкикипящее рабочее тело.

ANALYSIS OF REFRIGERATORS EJECTOR EFFICIENCY FOR DIFFERENT REFRIGERANTS

A. Radchenko, D. Kononov, S. Forduy, R. Radchenko, S. Kantor, V. Khaldobin

Modern heat-using ejector refrigeration machines used in heat recovery systems for power plants based on gas turbine engines and internal combustion engines have many advantages over absorption refrigeration machines: smaller dimensions and weight; the ability to obtain lower temperatures. However, they are inferior in energy efficiency, and the thermal coefficient is much lower and can be 0.2...0.4. The efficiency of such refrigeration machines largely depends on the choice of the working fluid (refrigerant). Hence the need to choose a refrigerant that would provide the maximum heat factor, and hence the maximum efficiency of heat recovery. Given the relatively low efficiency of the ejector refrigeration machine, the search for a working fluid that will provide, on the one hand, higher

thermal coefficients, and on the other hand high environmental friendliness, is one of the promising areas of development of heat recovery technologies in power plants. The study used the software complex developed by the authors to calculate the refrigeration cycles of heat-using refrigeration machines, taking into account the properties of many modern refrigerants, ejector characteristics, as well as basic heat exchangers (condenser, evaporator, generator). The efficiency of ejector refrigeration machines when working on the following working bodies was analyzed: R142b, R134a, R600, R600a, R1234ze(E), R1233zd(E), R1234yf, R227ea, R236fa, R245fa. R142b, R600, R600a, R245fa have the largest values of thermal coefficients. It is established that the most profitable in terms of environmental friendliness (ODP, GWP) and energy efficiency is the use of refrigerant R245fa, which has a condensation temperature range is 25...35 °C and boiling in the evaporator is 0...15 °C thermal coefficient is 0.40...1.03.

Keywords: ejector; refrigerator; heat recovery; trigeneration; low-boiling working fluid.

Радченко Андрій Миколайович – канд. техн. наук, доц., Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Коновалов Дмитро Вікторович – д-р техн. наук, зав. кафедри теплотехніки, Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна.

Фордуй Сергій Георгійович – канд. техн. наук, технічний керівник напрямку енергоресурсів та енергозбереження PepsiCo, Inc., CTS ESSA, Київ, Україна.

Радченко Роман Миколайович – канд. техн. наук, доц., Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Кантор Сергій Анатолійович – канд. техн. наук, ПАТ "Завод "Екватор", Миколаїв, Україна.

Халдобін Віктор Павлович – аспірант кафедри кондиціювання та рефрижерації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Andrii Radchenko – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Ship Electroenergetic Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8735-9205.

Dmytro Kononov – Doctor of Technical Sciences, Head Department, The Kherson Branch of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: dimitriyko79@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7127-0487.

Serhiy Forduy – Candidate of Technical Science, Sr. Engineering manager PepsiCo, Inc., Central Technical Team-Europe and Sub Saharan Africa (CTS ESSA), Kyiv, Ukraine, e-mail: serhiy.forduy@pepsico.com, ORCID: 0000-0003-0110-4090.

Roman Radchenko – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8099-7327.

Sergiy Kantor – Candidate of Technical Science, PJSC "Zavod Ekvator", Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5050-5937.

Viktor Khaldobin – Ph.D. student of Department of Air Conditioning and Refrigeration of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: mr.khaldobin@inbox.lv, ORCID: 0000-0002-0498-4401.