УДК 621.56

КОНОВАЛОВ Д.В., аспірант, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ХОЛОДОАГЕНТІВ У СУДНОВИХ ТЕПЛОВИКОРИСТОВУЮЧИХ ЕЖЕКТОРНИХ

Проаналізована ефективність застосування озонобезпечних холодоагентів у суднових тепловикористовуючих ежекторних холодильних машинах. Поряд із потенціалами руйнування озонового шару і глобального потепління та пожежобезпечністю як екологічними та експлуатаційними критеріями використовувався також тепловий коефіцієнт як енергетичний критерій. За екологічною безпечністю слід віддати перевагу природним холодоагентам *R*600 і *R*600*a*, але вони пожежонебезпечні.

The effectiveness of the use of ozone-non-depletion refrigerants in ship waste heat recovery ejector refrigeration machines was estimated. Besides Ozone Depletion Potential, Global Warming Potential and fire safety as ecological and maintenance criteria the heating coefficient as energetic criterion was also used. The natural refrigerants *R*600 and *R*600*a* from ecological safety and energetic effectiveness are preferable, but they are flammable.

1. Аналіз проблеми, виділення невирішених задач. Постановка задачі дослідження

Існує декілька напрямків підвищення енергетичної ефективності тепловикористовуючого технологічного обладнання. Перший напрямок полягає в підвищенні ККД установки; другий – в утилізації скидного тепла. Найбільш поширені низькопотенційні теплові втрати (при t = 150 °С і нижче). До них можна віднести втрати тепла з парою від технологічних установок харчової промисловості [8], димовими газами двигунів внутрішнього згоряння та інші. На рибопромислових суднах втрати низькопотенційного тепла від технологічного обладнання сягають 10...20 % [6].

Утилізувати тепло такого потенціалу можна у різних установках, у тому числі і в холодильних машинах. Схема тепловикористовуючої ежекторної

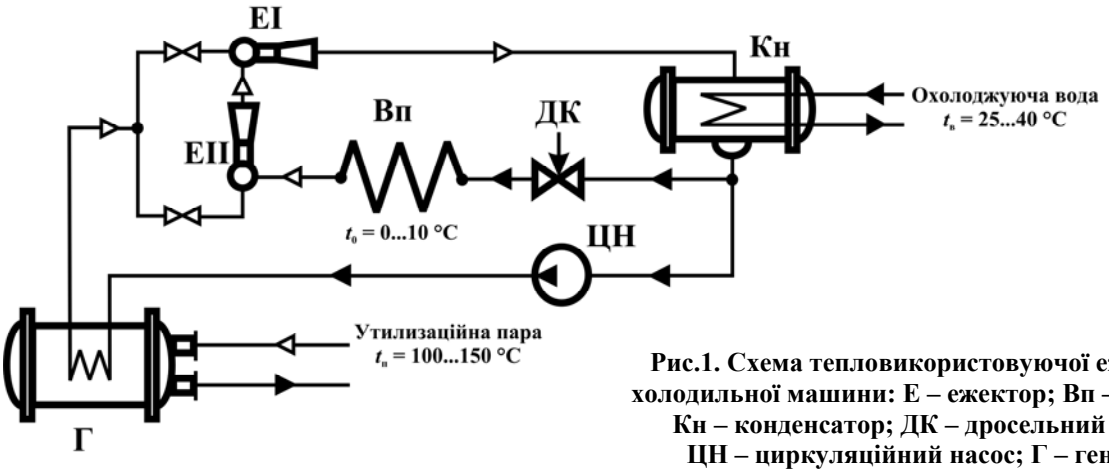

Рис.1. Схема тепловикористовуючої ежекторної холодильної машини: Е – ежектор; Вп – випарник; Кн – конденсатор; ДК – дросельний клапан; ЦН – циркуляційний насос; Г – генератор

У цьому типі холодильних машин функцію компресора виконує ежектор. До його достоїнств слід віднести високу надійність завдяки відсутності рухомих частин, простоту конструкції, малі габарити, простоту обслуговування, можливість відсмоктування будь-якої газоподібної речовини, в тому числі і з різними домішками, або краплинної рідини, мале споживання електроенергії циркуляційним насосом (10...20 Вт на 1 кВт холоду). Одним із плюсів ТЕХМ є застосування ежектора замість компресора. Відсутність в ежекторі рухомих частин виключає необхідність мастила в системі, а значить і застосування масловідокремлювача, що підвищувало б вартість ТЕХМ.

Потенціал тепла, яке підводиться до генератора пари ТЕХМ, визначає діапазон температур кипіння у випарнику [4]. Для ТЕХМ при температурі утилізованої пари $t_п$ = 100...150 °С мінімальна ефективна температура кипіння у випарнику t_0 = 0...10 °С, що відповідає температурному режиму роботи холодильної машини систем кондиціонування повітря.

До теперішнього часу в ТЕХМ як холодоагент активно застосовувалися хлорфторвуглеводні (фреони) та вода. Але використовування води для утилізації низкопотенційного тепла не так ефективно, як фреонів [3]. Головною особливістю фреонів є їхня висока хімічна і термічна стабільність, яка обумовлює тривалий термін їхнього розпаду в атмосфері. В ході досліджень, які проводилися у 80-х і 90-х роках минулого сторіччя і стали предметом обговорення на важливих міжнародних конференціях з екологічної безпеки (Віденська конвенція ООН по охороні озонового шару 1985 р., Монреальській протокол 1987 р.), було встановлено, що фреони є головною причиною руйнування озонового шару. До числа заборонених увійшли такі холодоагенти, як *R*11, *R*12, *R*22, *R*113, *R*21, *R*142*b*.

Після саміту в Ріо-де-Жанейро (1992 р.) і конференції в Кіото (1997 р.) був встановлений перелік газів, які активно впливають на розповсюдження глобального потепління на Землі. До їх числа увійшли також і фреони. У зв'язку з цим виникла необхідність пошуку альтернативних холодоагентів, які були б не тільки озонобезпечними, але й не спричиняли парниковий ефект.

Серед фреонів найбільш ефективним для використання в ТЕХМ з енергетичної і економічної точок зору вважається *R*142*b* [1, 4]. Проте він не відповідає повною мірою вимогам міжнародних конвенцій щодо захисту навколишнього середовища. В роботі [4] зроблена спроба аналізу вибору холодоагенту для ежекторної холодильної машини, проте остаточного висновку відносно того, яка речовина найкраще підходить для ТЕХМ, так і не зроблено.

Робочими речовинами, які могли б замінити *R*142*b* є *R*600 (бутан), *R*600*a* (ізобутан), *R*123 (3-фтор, 2-хлоретан), R134a (тетрафторетан). В табл. 1 наведені

Таблиця 1.

Фізичні властивості холодоагентів

Найменування холодоагенту	Назва	Хімічна формула	Молекулярна маса μ, г/моль	Критична температура $t_{кр}$ °С	Нормальна температура кипіння, $t_{н.к}$ °С	Тиск критичний, $P_{кр}$, МПа
*R*600	н-бутан	CH_3-CH_2-CH_2-CH_3	58,12	152,0	-0,5	3,80
*R*600*a*	ізобутан	$CH(CH_3)_2$-CH_3	58,12	134,7	-11,6	3,64
*R*142*b*	діфторхлоретан	CH_3-$CClF_2$	100,49	137,1	-9,0	4,12
*R*134*a*	тетрафторетан	CH_2F-CF_3	102,03	101,1	-26,1	4,06
*R*123	тріфтордихлор-етан	$CHCl_2$-CF_3	152,93	183,8	27,8	3,66

2. Порівняльний аналіз екологічної ефективності

Оцінку дії холодоагенту на навколишнє середовище можна зробити за двома основними характеристиками: 1) руйнуюча дія на озоновий шар; 2) вплив на розповсюдження глобального потепління. До першого слід віднести потенціал руйнування озонового шару (*ODP – Ozone Depletion Potential*). *ODP* показує, у скільки разів потенціал руйнування озонового шару відповідної речовини більше потенціалу *R*11 (див. табл. 2). До другого слід віднести потенціал глобального потепління (*GWP – Global Warming Potential*). *GWP* показує, у скільки разів парниковий ефект від відповідної речовини більше парникового потенціалу CO_2 за певний проміжок часу.

Холодоагенти *R*600, *R*600*a*, як видно з табл. 2, є повністю озонобезпечними і слабо впливають на "парниковий ефект". *R*134*a*, хоча і є озонобезпечним, проте має *GWP* в 80 разів більший. Слід також відзначити, що *R*600 і *R*600a є природними речовинами, що спрощує їх отримання, а *R*134*a* одержують за допомогою різних хімічних реакцій,

Таблиця 2.

Екологічні властивості холодоагентів

Найменування холодоагенту	Час життя в атмосфері, років	Озоноруйнуючий потенціал *ODP*	Потенціал глобального потепління *GWP*
*R*600	–	0	~20
*R*600*a*	–	0	~20
*R*142*b*	18,5	0,043	2300
*R*134*a*	13,6	0	1600
*R*123	1,4	0,012	120

Примітка: прийнято ODP_{R11} = 1, GWP_{CO2} = 1.

3. Порівняльний аналіз експлуатаційних показників та безпеки застосування

*R*123 має високу температуру кипіння при атмосферному тиску ($t_{н.к}$ = 23 °С). Це означає, що кипіння у випарнику при більш низькій температурі можливе лише під вакуумом. Наявність розрядження може призвести до попадання повітря в систему, відповідно необхідна установка повітровідокремлювача, що різко підвищує вартість ТЕХМ і ускладнює її експлуатацію. При атмосферному тиску *R*600 має температуру кипіння $t_{н.к}$ = −0,5 °С. При температурі кипіння в 0...10 °С у випарнику має місце невеликий тиск, що сприяє зменшенню металоємності обладнання (на відміну від *R*600*a*, *R*134*a*), а також полегшує забезпечення повної герметичності системи.

В табл. 3 наведені основні показники безпечного використання холодоагентів, до яких відносяться:

1) нижня межа займання, або мінімальна його концентрація в повітрі, при якій він здатний займатися;

2) температура займання, або мінімальна температура, при якій він виділяє горючу пару з такою швидкістю, що після займання її від джерела запалювання виникає стале горіння;

3) теплота згоряння, або кількість енергії, що виділяється при повному згорянні 1 кг холодоагенту.

Згідно з європейським стандартом *ASHRAE* 34 холодоагенти *R*134*a*, *R*123 є пожежобезпечними. Проте *R*123 дуже токсичний. *R*600, *R*600*a*, *R*142*b*, *R*134*a* не токсичні, але *R*600 і *R*600*a* мають високий ступінь пожежонебезпечності.

Токсичність холодоагентів показана окремо в табл. 4. Основним показником токсичності, за яким розділяються холодоагенти, є *TLV-TWA* (*Threshold Limit Value – Time Weighted Average*) – вагова концентрація, припустима при 8-годинній робочій зміні, та 40-годинному робочому тижню. Для оцінки

Таблиця 3.

Безпека використання холодоагентів

Найменування холодоагента	Клас небезпеки *ASHRAE* 34	Нижня межа займання %	Теплота згоряння, МДж/кг	Температура займання, °С
*R*600	*A3*	1,8	49,4	405
*R*600*a*	*A3*	1,9	49,5	455
*R*142*b*	*A2*	6,9	9,8	
*R*134*a*	*A1*	немає	4,2	
*R*123	*B1*	немає	2,1	

Таблиця 4.

Токсичність холодоагентів

Найменування холодоагента	Токсичність (*TLV-TWA*), ‰	*IDLH*	EC_{50}	LC_{50}	Серцева чутливість	
					LOEL	*NOEL*
*R*600	800	–	130000	280000	5000	—
*R*600*a*	800	–	130000	280000	5000	—
*R*142*b*	1000	–	250000	128000	50000	25000
*R*134*a*	1000	50000	205000	567000	75000	50000
*R*123	50	4000	40000	32000	20000	10300

Примітки: токсичність дана в промілле (*ppm*)

токсичності можуть бути використані й інші показники [2]:

- характеристика небезпеки для життя та здоров'я людини при короткочасному впливі газу – *IDLH* (*Immediately Dangerous to Life and Helth*);
- анестезуюча дія газу – anesthesic EC_{50};
- середня летальна концентрація при вдиханні – LC_{50};
- вплив газу на сердечну діяльність людини – найвища концентрація, яка не призводить до підвищеної серцевої активності (*NOEL – No-Observed Effect Level*) та найнижча концентрація, що викликає серцеву аритмію (*LOEL – Lowest-Observed Effect Level*).

4. Порівняльний аналіз енергетичних показників

В табл. 5 наведено основні показники енергетичної ефективності застосування холодоагентів. Коефіцієнт ежекції *U* характеризує ефективність роботи ежектора і являє собою відношення витрат підсмоктуваного (неробочого) холодоагента низького тиску (із випарника) і силового (робочого) холодоагента високого тиску (від генератора) Його розрахунок виконано за методикою [9]. Всі показники подано для температури кипіння у випарнику t_0 = 5 °С, конденсації $t_к$ = 35 °С і кипіння холодоагента в генераторі $t_г$ = 100 °С. *R*600 і *R*600*a* мають найбільший коефіцієнт ежекції *U*, рівний 0,251 і 0,256 відповідно, та найбільший коефіцієнт трансформації тепла ζ, який характеризує термодинамічну ефективність циклу ТЕХМ. Вони також мають вдвічі більшу, ніж у інших фреонів, теплоємність, що позитивно характеризує їх акумулюючу здатність, і вдвічі меншу витрату холодоагента в системі, що позитивно позначається на економічності. *R*600 і *R*600*a* мають у два рази більшу питому холодопродуктивність ніж *R*134*a*, *R*123, *R*142*b*.

Таблиця 5.

Енергетична ефективність

Найменування холодоагента	*R600*	*R600a*	*R142b*	*R134a*	*R123*
Коефіцієнт ежекції *U*	0,251	0,256	0,248	0,200	0,211
Тепловий коефіцієнт ζ	0,177	0,179	0,188	0,189	0,153
Ступінь підвищення тиску *e*	2,661	2,495	2,626	2,534	3,189
Ступінь розрядження *E*	12,306	10,723	12,213	11,354	19,231
Витрата холодоагента на 1 кВт холоду, кг/с	0,01596	0,01754	0,02813	0,03965	0,03846
Питома масова холодопродук-тивність q_0, кДж/кг	312,3	279,7	178,9	151,3	149,2
Питома об'ємна холодопродук-тивність q_v, кДж/м^3	1021,9	1406,5	1431,4	2608,5	415,0
Питоме теплове навантаження на генератор $q_г$, кДж/кг	441,9	399,9	236,4	160,4	205,4
Питома потужність насоса *N*уд.н, кВт/кВт	0,0103	0,0399	0,0352	0,0873	14,55
Питома ізобарна теплоємність рідини *c*, кДж/(кг К)	2,288	2,362	1,230	1,344	0,902
Питома теплота пароутворення *r* (t_0 = +5 °С), кДж/кг	377,25	217,1	350,99	193,4	178,06
Питома теплота пароутворення *r* ($t_г$ = +100 °С), кДж/кг	262,96	139,9	213,66	34,4	133,82

5. Висновки

1. Найбезпечнішим в експлуатації є *R*134*a*, проте він має меншу енергетичну ефективність, ніж *R*600 і *R*600*a*, і велику вартість.
2. За термодинамічною й екологічною ефективністю доцільно застосовувати холодоагенти *R*600 і *R*600*a*. Але вони мають високий ступінь токсичності (800 *ppm*) і пожежонебезпечності (3 клас за *ASHRAE* 34). Зараз ізобутан (*R*600*a*) почав активно застосовуватися вітчизняними виробниками холодильної побутової техніки, що свідчить про можливість безпечного використання подібних холодоагентів за умови забезпечення повної герметичності обладнання.
3. *R*600 і *R*600*a* як робоче тіло для ежекторних установок раніше не застосовувалися, тому потрібні додаткові експериментальні дослідження їхньої термодинамічної, експлуатаційної та економічної ефективності в ТЕХМ.
4. Застосування в холодильній техніці природних холодоагентів, подібних *R*600 і

Література

1. Жадан С.З., Петренко В.А. Испытание полупромышленной эжекторной холодильной машины на фреоне 142 в условиях литейного производства // Сб. Холодильная техника и технология. – Вып. 26. – К.: Техника, 1978. – с.72 – 77.
2. Желєзний В.П., Возний В.Ф. Умови безпечного використання холодоагентів // Холод, № 4, 2003, с. 23 – 25.
3. Захаров Ю.В. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины. – СПб.: Судостроение, 1994. – 504 с.
4. Петренко В.А. Принцип выбора рабочего вещества для эжекторной холодильной машины // Холодильна техніка і технологія, №1 (70), 2001. – с. 16 – 21.
5. Промышленные фторорганические продукты: Справ. изд. / Б. Н. Максимов, В. Г. Баранов, И. Л. Серушкин и др. – Л.: Химия, 1990. – 464 с.
6. Радченко Н.И., Сирота А.А., Коновалов Д.В., Есин А.И. Теполоиспользующая установка для производства технологического пара // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології (додаток до журналу “Холодильна техніка і технологія” №4 2003).– с. 122 – 127.
7. Сильман М.А., Шумелишский М.Г. Пароводяные эжекторные холодильные машины. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1989, с.
8. Сирота А.А., Радченко Н.И., Коновалов Д.В. Теплоиспользующий контур для выпарных установок // Авіаційно-космічна техніка і технологія, №7 (42), 2003. – с. 67 – 72.
9. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1970, 288 с.