

УДК 629.12+621.69

Галян І.С., Козьминих М.А., Ольшамовський В.С.
Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ АГЕНТІВ В ТРАНСПОРТНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

Anotation

The article deals with the analysis of the efficiency of modern refrigeration agents in transport refrigeration units. refrigeration unit is an integral part of maritime transport. One of the most relevant in the field of transport refrigeration units is the issue of the use of refrigerants that meet the current environmental requirements.

Investigating the concentration of ozone in the earth's atmosphere, scientists drew attention to a significant decline in the early 80-ies. The general content of stratospheric ozone

Today, the most commonly used refrigeration agent, which is subject to further replacement is the refrigerant R134a. In this regard, it becomes acute the need to investigate new refrigerants, their properties and their effects on performance indicators of refrigeration units.

For the most complete analysis in the assortment of modern refrigeration agents for comparison, selected refrigerants of different groups and compositions are selected. Thus, the selected R22, R134A are single-component, and R407C, R410A-mixtures. R22 contains chlorine, R134A, R410A, R407C, R404A, R507-chloride does not contain.

Each of the studied refrigerants is considered as an alternative to the R-22, but one can not definitely say that one of the refrigerants is better than the other, since the refrigerants are different in their specific cold-productivity, heat transfer coefficient, condensation pressure.

The main factors determining the choice of a refrigerant are, of course, its thermodynamic and thermophysical characteristics. They affect the efficiency, performance and design characteristics of the RP. Widespread use in refrigeration technology have found fluorochloro-carbon refrigerants, possessing the necessary thermodynamic and thermophysical qualities. Properties of the refrigerants depend on the structure of the molecule of matter, the ratio of fluorine, chlorine and hydrogen molecules in its composition

Only recommendations are given in the work. Therefore, the analysis should also take into account the vibrations in the evaporators and in the condensers, the cost of refrigerants themselves and the cost of refrigeration equipment.

However, for the preliminary assessment of the feasibility of both retrofit and the development of recommendations for the design of new plants, this approach is acceptable and may be recommended.

Key words: Ozone layer, refrigeration agent, ship refrigeration unit, operating indexes, efficiency of application

Одним з найбільш актуальних у галузі транспортних холодильних установок є питання застосування холодоагентів, що відповідають сучасним екологічним вимогам.

Суттєвий крок до захисту озонового шару Землі був зроблений в жовтні 1987 р. в Монреалі, де 36 країн підписали Протокол по речовинах, що руйнують озоновий шар. Україна приєдналася до Монреальського протоколу в 1988 році. Ця міжнародна угода передбачала заморожування виробництва п'яти найбільш використовуваних холодоагентів на базі галогенизованих вуглеводів (ХФУ). Їх виробництво мало скоротитися на 20 %, а до 1998 р. - на 30 %. До червня 1995 Монреальський протокол підписали близько 150 країн, а на ювілейній монреальській зустрічі у вересні 1997 р. таких країн було вже 163

У листопаді 1992 року в Копенгагені були прийняті нові поправки, відповідно до яких з'явилася вимога про поетапне виведення з виробництва метилброміду і гідрохлорфтор-вуглеводів (ГХФВ).

Сьогодні найбільш розповсюдженим холодильним агентом, який підлягає подальшій заміні є холодоагент R134A. У зв'язку з цим актуальною стає необхідність дослідження нових холодоагентів, їх властивостей та їх впливу на експлуатаційні показники холодильних установок (ХУ).

Альтернативні холодоагенти групи гідрофторвуглеводів (ГФВ) мають різноманітний хімічний склад, фізичні властивості та термодинамічні особливості. Тому для дослідження можливості заміни холодоагенту або його використання у новому обладнанні необхідно з'ясувати як впливає на експлуатаційні показники ХУ застосування конкретного холодоагенту.

Вибір хладагентів для суднової холодильної установки.

Для вибору хладагентів, які будуть порівнюватися розглянемо класифікацію альтернативних хладагентів. (Мал.1). Для найбільш повного аналізу в асортименті сучасних холодильних агентів для порівняння обираємо хладагенти різних груп та складів. Так обрані R22, R134A - однокомпонентні, а R407C, R410A - суміші. R22 містить хлор, R134A, R410A, R407C, R404A-хлору не містять.

Основними чинниками, що визначають вибір хладагенту, безумовно, є його термодинамічні та теплофізичні характеристики. Вони впливають на ефективність, експлуатаційні показники і конструктивні характеристики ХУ. Широке застосування в холодильній техніці знайшли фторхлорвуглецеві хладагенти, що володіють необхідними термодинамічними і теплофізичними якостями. Властивості хладагентів залежать від структури молекули речовини, співвідношення молекул фтору, хлору і водню в його складі.

Отже усі вибрані хладагенти можуть використовуватися як альтернативні для R22.

Розглянемо усі обрані хладагенти за їх основними характеристиками, взаємодією з мастилами, матеріалами, фізичними властивостями.

Хладагент R134A - $\text{CF}_3\text{-CFH}_2$ – тетрафторетан, гідрофтор-вуглецеве з'єднання (HFC). R134A має нульовий озоноруйнуючий потенціал (ODP = 0). R134A є ідеальним хладагентом для роботи в умовах високих температур кипіння і конденсації. R134A - це безпримісний хладагент, який має нульове температурне «ковзання». При роботі R134A завжди використовуються поліефірні мастила.

Хладагент R134A нетоксичний і не займається у всьому діапазоні температур експлуатації. Проте при попаданні повітря в систему і стисненні можуть утворюватися горючі суміші. Не слід змішувати R134A з іншими хладагентами, так як утворюється азеотропна суміш. Пар R134A розкладається під впливом полум'я з утворенням отруйних сполук.



Рис. 1. Огляд альтернативних холодоагентів

Через значний потенціал глобального потепління GWP рекомендується застосовувати R134A в герметичних холодильних системах. Вплив R134A на парниковий ефект в 1300 разів сильніше, ніж у CO₂.

Для роботи з холодоагентом R134A рекомендуються тільки поліефірні холодильні мастила, які характеризуються підвищеною гігроскопічністю. R134A широко використовують в якості основної заміни R22 для холодильного обладнання, що працює в середньотемпературному діапазоні. R134A сумісний з низкою ущільнюючих матеріалів, зокрема з прокладками, зробленими з таких матеріалів, як «Буна-Н», «хайпалон 48», «Неопрен», «Нордел», а також з шлангами, футурованими нейлоном.

Альтернативні багатокомпонентні холодоагенти групи ГФУ R407C та R410A

Холодоагент R407C має нульовий озоноруйнуючий потенціал (ODP = 0), потенціал глобального потепління (GWP) дорівнює 1600.

R407C - це зеотропна суміш групи ГФВ (23% R32 + 25% R125 + 52% R134a), температурне ковзання становить близько 6К. R407C потрібно заправляти в систему в рідинній фазі. Використовуються поліефірні мастила.

R407C доцільно застосовувати при заміні для хладону 22, ретрофіті та в новому обладнанні.

Подібно холодоагенту R22, R407C володіє малою токсичністю, хімічно стабільний і негорючий.

Холодоагент R410A - це азеотропна суміш, що складається з R32 і R125, що мають однакову питому вагу масових часток - по 50%.

Перевагою фреону R410A є те, що жодна з речовин, що входять до його складу, не руйнує озоновий шар.

Застосування даного холодоагенту відрізняється високою питомою холодопродуктивністю, внаслідок чого стає реальним зменшення розмірів трубопроводів, тепло-обмінників і т.д.

Температура хладону R410A не змінюється при переходах з однієї фази в іншу. Навіть якщо стався витік суміші з системи, склад її залишається незмінним. Заміна хладону є економічно вигідною, оскільки контур системи необхідно заповнити лише частково.

Так само, як і хладон R407C, R410A не розчиняється у мінеральному мастилі і потребує застосування поліефірного синтетичного мастила.

Аналіз експлуатаційних показників холодильної установки при застосуванні альтернативних холодоагентів.

Для аналізу експлуатаційних показників були прийняті режими роботи суднової холодильної установки при температурах випарювання від -30°C до $+5^{\circ}\text{C}$, що охоплює найбільш можливі експлуатаційні режими. Показники холодильної установки були розраховані для холодоагентів R22, R134A, R410A, R407C. Для дослідження зміни експлуатаційних показників ХУ, обираємо наступні найбільш характерні термодинамічні властивості та експлуатаційні показники:

- тиски конденсації та випарювання $p_{\kappa}, p_{\text{вип}}$;
- дійсна масова подача компресора G_0 ;
- адіабатна(теоретична) ,індикаторна, ефективна потужності та потужність на валу електродвигуна $N_a, N_i, N_e, N_{\text{ел.д}}$;
- індикаторний, механічний, ефективний та електричний ККД $\eta_i, \eta_m, \eta_e, \eta_{\text{ел.д}}$;
- теоретичний, ефективний та електричний холодильні коефіцієнти $\varepsilon_m, \varepsilon_e, \varepsilon_{\text{ел}}$.

Розглянувши результати розрахунків параметрів холодоагентів у вузлових точках можна побудувати гістограму тисків конденсації та випарювання (мал. 2)

Холодоагент R-410A має значно вищий у порівнянні з іншими холодоагентами тиск конденсації, який дорівнює 1.87 МПа і вищий за тиск конденсації R22 у 1.57 рази. З гістограми видно, що холодоагент R134A доцільно застосовувати при більш низьких тисках, а R410A - при більш високих, тому конструктивно холодильне обладнання на R410A буде суттєво відрізнятися.

R407C-має найбільш наближене значення показників до R22, тому цей холодоагент - гарний вибір для ретрофіту.



Мал 2 Тиски конденсації та випарювання

Проаналізувавши результати розрахунків, побудовано гістограми, які наглядно ілюструють зміну таких показників, як масова подача компресора (мал.3), адиабатна, індикаторна ефективна та електрична потужності (мал.4), ККД (мал 5).

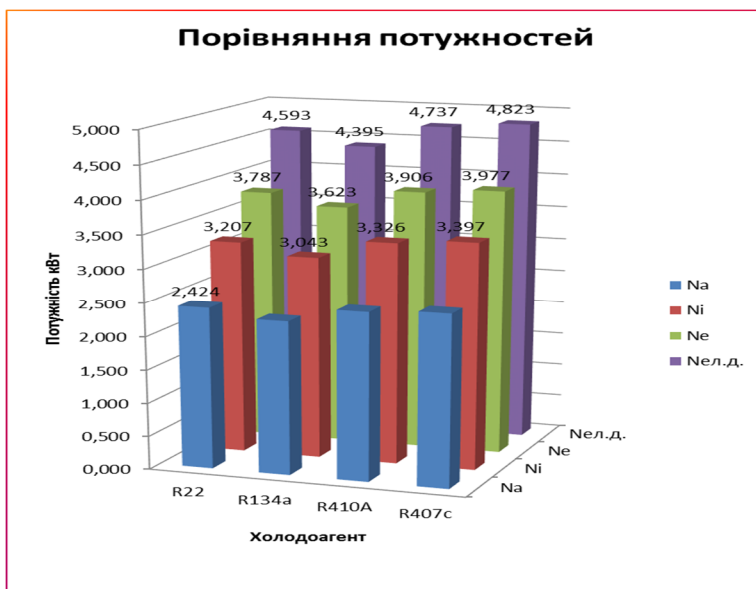
Розраховані значення свідчать про наступні зміни експлуатаційних показників (порівняно з базовим холодоагентом R22) : масова подача компресора на R134A збільшилася на 8,5%, R407C на 2,1%, а на R410A-зменшилася на 4,2%; адиабатна потужність на R134A зменшилася на 5,1% і збільшилася на 3,7% та 5,9% при роботі на R410A та R407C відповідно; потужність на валу електродвигуна для R134A

зменшилася на 4,3% ,для R410A збільшилася на 3,1%,для R407c збільшилася на 5.9%.Також маємо незначне зменшення ККД для R134A та збільшення ККД для R410A та R407C.



Мал.3 Дійсна масова подача компресора

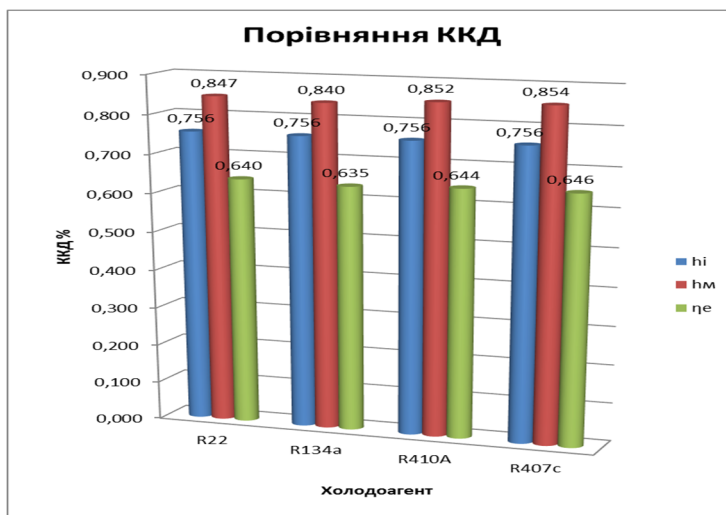
При аналізі беремо до уваги і інші фактори: наскільки далеко від критичної точки реалізований холодильний цикл (це впливає на відношення прихованої теплоти пароутворення до питомої теплоємності рідини при постійному тиску), нахил кривих насичення рідини і пара, за яким визначають результативність перегріву, переохолодження і дроселювання. На нахил кривих істотно впливає мольна теплоємність.



Мал.4 Порівняння потужностей

На малюнку 6 показані діаграми $T - s$ для R22 і його заміників, завдяки яким можна провести якісну оцінку впливу термодинамічних властивостей на холодильний коефіцієнт. Криві насичення показані як безрозмірні величини, що мають однакову ширину двофазного купола (тобто, для насиченої рідини $s=0$, для насиченої пари $s=1$). З графіку видно, що критична температура для R134A вище, ніж для R22, а для R410A та R407C значно нижча.

При однакових температурах кипіння і конденсації цикл, що використовує R134A, знаходиться далі від критичної точки, ніж цикл на R22, і набагато нижче, ніж цикли на R410A і R407C.

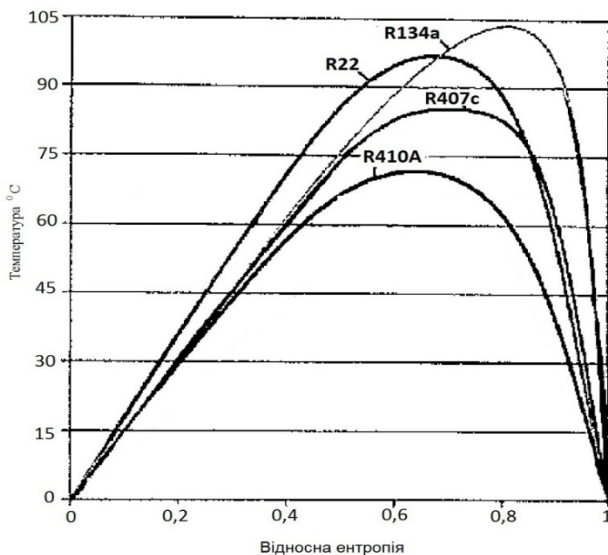


Мал.5 Порівняння ККД

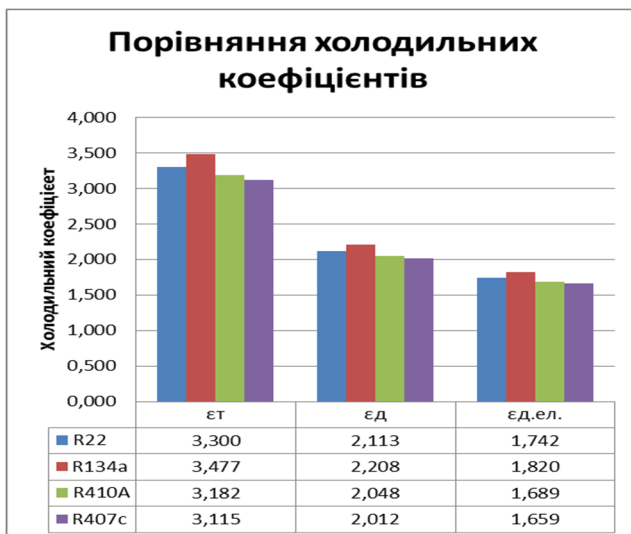
На незворотність процесів дроселювання і перегріву пари впливає нахил кривих насичення. Втрати від незворотності значно вище поблизу критичної точки, де лінії насичення поступово стають більш пологими, формуючи двофазний купол.

Критична температура R410A та R407C нижче, ніж у R22. З цієї причини, незворотність через перегрів пари і незворотність, викликана дроселюванням, найвища для R410A, потім для R407C і найменша для R134A .

Дослідивши холодильні коефіцієнти, можна зробити висновок, що саме так як холодильна машина, кращі показники буде мати установка на холодоагенті R-134A. Холодильний коефіцієнт на R134A більший ніж на R22 за розрахунками при однакових умовах на 4,5%.(Мал.7).



Мал.6 Діаграми холодоагентів R22, R134A, R410A, R407C



Мал.7 Холодильні коефіцієнти

Комплексна оцінка застосування холодоагентів в суднових холодильних установках

Кожен з досліджуваних холодоагентів розглядається як альтернативний до R22, але не можна однозначно визначити, що один з холодоагентів кращий за інші, оскільки холодоагенти різні за своєю питомою холодопродуктивністю, коефіцієнтом тепловіддачі, тиском конденсації.

Аналіз отриманих даних дозволяє сформулювати наступні загальні положення:

- в порівнянні з R22 холодоагент R407C робить значно менший шкідливий вплив на навколишнє середовище (значення потенціалу глобального потепління GWP у R407C майже таке ж, як і у R22, потенціал руйнування озону ODP дорівнює нулю);

- при більш низькій температурі нагнітання і трохи більш високому тиску нагнітання енергетична ефективність R407C близька до енергетичної ефективності R22;

- при низькотемпературному охолодженні слід очікувати значне падіння холодопродуктивності R407C внаслідок високого вмісту R134A.

- холодоагент R 407C є найбільш простим і дешевим замінником R 22 зі схожими термодинамічними характеристиками, що відповідають за холодопродуктивність компресора, отже, і всього агрегату.

R134A (1300 GWP -потенціал глобального потепління, ODP = 0:

- володіє меншою питомою холодопродуктивністю в порівнянні з R22, отже потрібна більша кількість холодоагенту, компресор більшого розміру або з більшою частотою обертання ротора;

- характеризується відносно низькими значеннями абсолютних робочих тисків;

- має набагато більш низький диференціал робочих тисків, ніж у R 407C і R 410A.

R134A є ідеальним холодоагентом для роботи в умовах високих температур кипіння і конденсації.

У середньотемпературних холодильних установках і системах кондиціонування повітря холодильний коефіцієнт R134A рівний коефіцієнту для R22 або вищий. Отже R134A – є вдалим альтернативним замінником для R22.

R134A є чистою однорідною речовиною (тетрафторетан - CF₂HCF₃). Однак R134A вимагає спеціальних конструктивних доопрацювань компресора, що в результаті призводить до збільшення вартості машини. З іншого боку, R134A характеризується дуже високою холодильною ефективністю, низькими значеннями робочого тиску, найнижчим з усіх перерахованих вище гідрофторвуглеців потенціалом глобального потепління та іншими перевагами.

R404A - це суміш, холодоагент введений в експлуатацію на початку 1992 р і відомий під промисловим найменуванням "Suva" HP62 (DuPont). Ця суміш абсолютно не містить хлору (ODP = 0) і тому може розглядатися в якості альтернативи R22. Тривале його застосування показало хороші результати.

Інші суміші реалізовувалися під найменуваннями "Forane" FX70 (Atofina) і "Genetron" AZ50 (AlliedSignal) або "Solkanе" 507 (Solvay). У номенклатурі ASHRAE холодоагент HP62 класифікован як R404A.

Основні компоненти відносяться до групи гідрофторвуглеців, причому R143A відноситься до категорії легкозаймистих. Займистість, так само як і проблеми, пов'язані з можливими витокami, ефективно нейтралізується завдяки поєднанню з відносно високим вмістом R125.

Особливістю всіх трьох інгредієнтів є надзвичайно низький показник адіабатичного стиснення, що виражається в аналогічній або навіть більш низькій температурі нагнітання в порівнянні з R22. Тому ефективність застосування одноступінчатих компресорів при низьких температурах випаровування гарантована.

Завдяки однаковим точкам кипіння R143A і R125 і відносно малому вмісту R134A температурне ковзання трикомпонентної суміші R404A в поширених областях застосування менше одного градуса Кельвіна. Тому поведінка цієї суміші в теплообмінниках мало відрізняється від поведінки азеотропних речовин.

Отримані результати розрахунків термодинамічних показників є задовільними.

Залежно від умов експлуатації забезпечуються підвищення холодопродуктивності на 4 ... 5% і зниження температури нагнітання в компресорі до 8% в порівнянні з аналогічними характеристиками R22.

Значним недоліком є високе значення потенціалу глобального потепління GWP, який складає для R404A 3300 та високі значення дійсної масової подачі та потужності на валу електродвигуна.

Для експлуатації R 410A характерні дуже високий тиск(на 57% вище, ніж у R22), низька критична температура і висока об'ємна холодопродуктивність(на 49,6% більше, ніж у R22), його можна використовувати тільки в спеціально розроблених нових агрегатах. Висока питома холодопродуктивність дозволяє використовувати компресор меншого типорозміру або з меншою швидкістю обертання ротора.

Розглядаючи R410A як заміну для R22, слід приймати до уваги суттєві відмінності в термодинамічних властивостях (наприклад, у масовій та об'ємній витраті, в щільності парів). Так масова подача R410A менша за масову подачу R22 на 4,2% а об'ємна подача менша на 33,8%.

Обґрунтування доцільності використання конкретного холодильного агенту базується на порівняльному аналізі енергетичних характеристик, фізичних властивостей та економічній складовій.

Однак в нинішній час не визначено комплексного показника, який би дозволив оцінити доцільність використання конкретних холодильних агентів з урахуванням як їх термодинамічних властивостей, так і екологічних факторів.

В якості основного показника, який характеризує енергетичну ефективність використання холодильного агенту доцільно визначити холодильний коефіцієнт ϵ . Основними показниками, що визначають екологічність холодильного агенту на нинішній час визнанні: потенціал руйнування озону (ODP) та потенціал глобального потепління (GWP), які використовуються для аналізу екологічної доцільності використання холодильного агенту.

Для полегшення процесу первинного вибору холодильного агенту можливо запропонувати введення комплексного показника, який буде враховувати вище вказані параметри. Виходячи з того, що для ефективного використання холодильного обладнання необхідно, щоб холодильний коефіцієнт був якомога вищий, а параметри ODP та GWP мінімальні, можливо використання формули :

$$K = \frac{\varepsilon}{GWP * ODP}$$

Для розрахунку комплексного показника доцільно ввести наступні умови : $ODP_p = ODP + 1$, $GWP_p = GWP * 10^{-3}$

Висновок

Для оцінки теплової ефективності можливо використовувати дійсний холодильний коефіцієнт та дійсний електричний холодильний коефіцієнти. Для оцінки енергетичних затрат на експлуатацію використовується показник ефективної потужності компресора.

По зазначеним показникам аналіз результатів розрахунків показує наступне:

При температурі випарювання $t_0 = -25^{\circ}\text{C}$ найбільше значення холодильного коефіцієнту характерне для R410A та R404A, а найбільша потуга КМ характерна для R410A, найменша для R404A.

Таким чином для температур кипіння близьких до -25°C , для нових холодильних установок безумовно можна рекомендувати для використання R404A, але у випадку проведення заміни холодильного агента в установці, яка вже знаходилась у експлуатації, має сенс використання холодильного агента R134A, у зв'язку зі спрощеною процедурою заміни холодильного агента.

При температурах випарювання, які перевищують -15°C , можливо рекомендувати до використання холодильний агент R407C, особливо в інтервалі температур $-15 \div -10^{\circ}\text{C}$, однак при цьому необхідно враховувати наявність такого явища, як температурний глайд, який вище ніж у холодильного агента R410A.

В роботі наведені попередні рекомендації. Тому в цілому, при аналізі необхідно також враховувати тиски у випарниках та конденсаторах, вартість самих холодильних агентів та вартість холодильного обладнання.

Однак для попередньої оцінки можливостей проведення як ретрофіту, так і розробки рекомендацій по проектуванню нових установок наведений підхід прийнятний та може рекомендуватись .

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Бабакин Б.С., Стефанчук В.И. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе. - М.: "Колос", 2000.
2. Белозеров Г.А., Медникова Н.М., Кусяйкин Г.А., Немчинова Н.И. Рекомендации по применению хладоносителей на предприятиях АПК. - М.: Россельхозакадемия, 2007.
3. Bitzerinternational. Обзор хладагентов. Издание 13. Internet address www.ykaxolod.com.ua
4. Правила технічної експлуатації суднових технічних засобів. РД 31.21.30-83.-М.:В/О «Мортехінформреклама»,1984.-388с.
5. Харлампида Д.Х., Братута Э.Г., Шерстюк А.В., Крупова Е.Г. Эколого-энергетические аспекты перевода действующих холодильных машин и тепловых насосов на современные хладагенты. – Харьков, 2012.