

Автореферат Н

У-УУ

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

ЧЕПУРНЕЦЬКО ВІТАЛІЙ АРКАДІЙОВИЧ

УДК 621.564: 629.463.125



**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МАЛИХ ХОЛОДИЛЬНИХ
МАШИН НА БАЗІ СУМІШЕЙ АМІАК – ФТОРОПОХІДНІ
ВУГЛЕВОДНІ**

05.05.14 - Холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Одеса – 2008

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Хмельнюк Михайло Георгійович,
завідувач кафедри холодильних машин і
установок Одеської державної академії
холоду МОН України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Жижиця Володимир Іванович,
професор кафедри електротехніки і
електронних пристроїв Одеської державної
академії холоду МОН України

кандидат технічних наук, професор
Арсеньєв В'ячеслав Михайлович,
професор кафедри технічної теплотехніки
Сумського державного університету МОН
України

Захист дисертації відбудеться «22» грудня 2008 року в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.41.087.01 в Одеській державній академії холоду за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

Дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОДАХ за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

Відправлений " 20 " листопада 2008 р.

спеціалізованої вченої ради

В.І. Мілованов

xv 1322

ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

- 1 -

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ратифікація Україною міжнародних угод по запобіганню руйнування стратосферного озонного шару і зменшенню емісії парникових газів призвела до зростання альтернативних можливостей розвитку технологій кондиціонування повітря і штучного охолодження. Одним із перспективних сценаріїв переходу від озоноруйнуючих холодоагентів до екологічно безпечних робочих тіл є повернення до використання природних холодоагентів (аміаку і вуглеводнів), які існують у природі і доказали свою сумісність із навколишнім середовищем. Можливість реабілітації аміаку як ефективного холодоагенту у багатьом залежить від усунення таких негативних якостей як токсичність, горючість, корозія при взаємодії з міддю, нерозчинність із традиційними мастилами, висока температура газу при стискуванні у компресорі. Одне із перспективних рішень полягає у додаванні компонентів, які б компенсували перелічені недоліки і підкреслили екологічні, енергетичні та економічні переваги «старого» нового природного холодоагенту.

В холодильній техніці для підвищення термодинамічної ефективності пароконденсійних циклів робоча речовина повинна мати достатньо високу критичну температуру, що відбраковує холодоагенти метанового і етанового рядів. Вимоги поєднання критичних температур близьких до R12 и R22 із максимальним значенням критерію пожежонебезпеки обмежують клас можливих кандидатів холодоагентами - фторпохідними вуглеводнями (RC316 1,2-дихлор -1,2,3,3,4,4- гексафторциклобутан, RC317 хлоргептафторциклобутан і RC318 октафторциклобутан), а також R131I(CF₃I), R1234ef, які активно просувають американські хімічні компанії

Науково-технічна програма сталого розвитку виробництва складної побутової техніки в Україні на 2006 – 2011 р.р. ставить перед виробниками холодильної техніки нетривіальну і суперечливу задачу переходу до створення нової техніки, що має максимальні показники енергозбереження, високу ступінь експлуатаційної безпеки і мінімальний озоноруйнуючий ефект. Таким чином, пошук нових композицій сумішей аміаку з пожежобезпечними холодоагентами, які відповідають сучасним вимогам, робить актуальними дослідження четвертого покоління холодоагентів для аміачних холодильних машин, що знижують як ризик займання аміаку, так і масу заправки, з одночасним збереженням високих енергетичних показників.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота виконувалась відповідно з програмою фундаментальних і пошукових досліджень, що відповідають Постанові Верховної Ради України від 4.02.2004р. Про ратифікацію Кіотського Протоколу; Постанові Кабінету Міністрів України №624 от 16.05.2002 г. « Про посилення державного регулювання ввозу і вивозу з України озоноруйнівних речовин»; Постанові Кабінету Міністрів України №256 от 04.03.2004 г., який затвердив «Програму припинення виробництва та використання озоноруйнуючих речовин до 2030р.», а також у

рамках держбюджетних робіт, що виконуються в Одеській державній академії холоду (№ гос. рег. 0103U001585).

Мета і завдання дослідження. Мета цієї роботи полягає в оцінюванні перспективності використання сумішей холодоагентів з аміаком, що знижують ризик займання аміаку і одночасно зберігають високі енергетичні показники аміачних парокомпресійних циклів холодильних машин.

Для досягнення наміченої мети були поставлені і вирішені наступні основні задачі:

1. розробки науково-технічних заходів по збалансованому зниженню ризику займання аміаку у малих холодильних машинах на основі створення бінарних композицій з пожежобезпечними компонентами – фторзаміщеними циклічними вуглеводнями;
2. пошуку азеотропних композицій аміаку із промисловими холодоагентами і, саме, пожежобезпечними добавками для усунення незворотних термодинамічних втрат із-за термічної нерівноважності між неазеотропним робочим тілом та джерелами (стоками) енергії (конденсатором та/або випарником);
3. побудови математичних моделей термодинамічної і фазової поведінки бінарних сумішей аміаку з пожежобезпечними добавками на основі фторзаміщених циклічних вуглеводнів для наступної оцінки енергетичної ефективності циклів холодильних машин і теплових насосів;
4. розробка і створення експериментального стенда для вивчення холодопродуктивності компресорів, які працюють на суміші аміак – пожежобезпечний компонент, з наступним моделюванням енергетичної ефективності малих холодильних машин і теплових насосів у більш широкому діапазоні параметрів стану.

Методи дослідження. При вирішенні зазначених задач використовувались методи експериментального визначення енергетичних характеристик роботи холодильного компресора. Використовувались адекватні математичні описи термодинамічної і фазової поведінки систем аміак – фторопохідні вуглеводні.

Об'єктами дослідження є парокомпресійні аміачні холодильні машини, що працюють на сумішах аміаку і пожежобезпечних холодоагентів, а також азеотропні робочі тіла холодильних систем.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

- вперше розроблена стратегія пошуку азеотропних композицій аміаку з пожежобезпечними добавками, що забезпечує досягнення раціональних критеріїв сталого розвитку малих холодильних машин і теплових насосів, за рахунок компромісу між високою енергетичною ефективністю системи і мінімізацією ризику займання суміші;
- експериментально знайдено, що системи аміаку з фторзаміщеними циклічними вуглеводнями виявляють явище гетероазеотропії в інтервалі концентрацій аміаку 0.7 ... 0.8;

- вперше розроблено адекватний математичний опис термодинамічної і фазової поведінки систем аміак – фторзаміщені циклічні вуглеводні на основі однорідної моделі рівняння стану Пенга – Робінсона для суміші і побудовані діаграми стану тиск – ентальпія для азеотропних концентрацій;
- вперше проведено порівняльний аналіз термодинамічної ефективності і показано переваги пожежобезпечних композицій аміаку із фторзаміщеними циклічними вуглеводнями порівняно із традиційними промисловими холодоагентами, які використовуються у малих холодильних машинах і теплових насосах;
- розроблено експериментальний стенд для дослідження холодопродуктивності компресорів, які працюють на сумішах аміак – фторопохідні вуглеводні, і здійснено оптимальний вибір композиції суміші на основі розробленої математичної моделі енергетичної ефективності холодильної системи за межі параметрів стану, вивчених у обмеженій кількості випробувань;
- розроблено рекомендації з практичного використання нового холодоагенту: суміші аміак – RC318, які включають правила безпечної роботи, методи визначення витоків, транспорт і зберігання, що являє значний інтерес для маркетингового просування холодоагенту, що пропонується.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень і результатів визначаються:

- коректною постановкою задач і перевіркою адекватності теоретичних моделей енергетичної ефективності холодильних машин і експериментальних даних;
- використанням сучасних математичних методів і програмних засобів рішення задач прогнозування термодинамічної і фазової поведінки систем аміак – фторопохідні циклічні вуглеводні.

Практичне значення одержаних результатів. В ході досліджень, енергетичних характеристик компресорів і холодильного приладдя на основі пожежобезпечних композицій аміаку, які проводились, одержано великий матеріал, що дозволив здійснити заходи по впровадженню у промисловість комплексу науково-технічних пропозицій, розроблених з участю автора. Це буде сприяти реалізації Україною прийнятих зобов'язань по виконанню Монреальського і Кіотського Протоколів.

Особистий внесок здобувача підтверджується науковими публікаціями, у яких відображено головні ідеї і положення теоретичних розробок і експериментальних результатів. В процесі роботи над дисертацією при безпосередній участі здобувача були створені експериментальні стенди для теплотехнічних випробувань компресорів; обґрунтовано вибір об'єктів дослідження і складена методика їх вивчення.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень були подані і обговорювались на: 4-й міжнародній науково-технічній

конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки й технології», Одеса, 2005; 6-й міжнародній конференції MIX, комісії B2 і B1 разом з комісіями E1 і E2 «COMPRESSORS 2006» 27 -29 вересня 2006, Паперніка (Словаччина); міжнародній науково-технічній конференції «Промисловий холод і аміак» Одеса, 2006; 5-й міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки й технології», Одеса, 2007; міжнародній конференції MIX B2 сумісно з B1 і D1 «Ammonia Refrigeration Technology for Today and Tomorrow», 19 - 21 квітня, 2007, Охрид, Македонія; 8-а Міжнародна конференція MIX IIF/IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, 7 – 10 вересня 2008, Копенгаген, Данія.

Публікації. Основний зміст дисертації представлено у сьомі статтях, опублікованих у фахових виданнях та збірниках наукових праць міжнародних конференцій, які відповідають вимогам ВАК України; 7 робіт подані у вигляді тез і доповідей у збірниках наукових робіт регіональних і міжнародних конференцій.

Об'єм і структура дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку використаної літератури із 142 джерел. Робота містить 144 сторінок основного тексту, включаючи 17 таблиць і 35 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації, відбивається зв'язок із державними програмами і темами, сформульовано цілі і задачі дослідження. Приведено нові наукові результати, конкретний особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів дисертації і основні публікації.

У **першому розділі** розглядається концепція сталого розвитку в аналізі ефективності систем виробництва штучного холоду і вибираються основні фактори – показники ефективності малих холодильних систем на основі сумішей аміаку із фторопохідними вуглеводнями, баланс між якими визначає стратегію сталого розвитку даного виду продукції на холодильному ринку. Детально обговорюються основні напрямки досліджень і розробок в області підвищення ефективності холодильних машин, які тісно пов'язані з проблемою глобального потепління:

- зменшення прямої емісії холодоагентів;
- пошук альтернативних холодоагентів четвертого покоління;
- зниження споживання енергії (зменшення непрямої емісії парникових газів);
- розробка нових технологій одержання штучного холоду

Намір виробників холодоагентів створити «ідеальне» робоче тіло, у якого би одночасно поєднувались суперечливі показники, такі як *екологічні* (нульовий потенціал глобального потепління, нульовий потенціал

руйнування озонового шару, низька токсичність, природне походження), *економічні* (низька ціна) та *енергетичні* (висока критична температура, добра розчинність з холодильним мастилом, низька трійна точка, сприятливі теплофізичні властивості та інш.), привело до розуміння того факту, що серед чистих речовин такого робочого тіла не існує. Найбільш перспективний підхід до пошуку компромісного рішення серед множини альтернатив базується на практично безмежних можливостях змішування вже відомих компонентів. Чудові термодинамічні властивості аміаку роблять його незамінною альтернативою для промислових холодильних установок холодопродуктивністю більше 20 кВт. Для малих холодильних машин використання аміаку стримується важкістю уникнути навіть малих витоків, які супроводжуються несприятливим для установок такого типу запахом.

Прагнення підвищити ефективність холодильної системи за рахунок введення селективних добавок до основного холодоагенту достатньо довгий час було предметом наукових розробок В.М. Бродяньського, Г.К. Лавренченка, М.Д. Захарова, А.П. Кузнецова, В.О. Мазура, В.П. Железного та інш. Основна ідея різного роду добавок полягає у збільшенні розчинності холодоагентів у мастилах. Збільшення розчинності приводить до збільшення теплоти випарювання, що, в свою чергу, підвищує енергетичну ефективність і холодопродуктивність пароконденсійних холодильних систем. Запропоновані рішення, як правило, рекомендують синтетичні хімічні сполуки, які при розгляді повного життєвого циклу виробництва селективної добавки частіше всього на практиці не можуть бути реалізовані. Можливість реабілітації аміаку як ефективного холодоагенту багато в чому залежить від усунення таких негативних якостей як токсичність, горючість, корозія при взаємодії з міддю, нерозчинність із традиційними мастилами, висока температура газу при стискуванні в компресорі. В даній роботі розглядаються селективні добавки до аміаку в класі холодоагентів, які вже випускаються промисловістю і доказали свою ефективність.

У **другому розділі** основна увага приділяється термодинамічним моделям сумішей аміаку із селективними добавками фторопохідних вуглеводнів - холодоагентам четвертого покоління, які базуються на природних робочих тілах із низьким потенціалом глобального потепління. Як основний компонент обрано природний холодоагент – аміак.

Клас компонентів, який вибрано в дисертації з метою покращення характеристик аміаку, обмежили фторопохідними циклічними вуглеводнями. Такий вибір був обґрунтований наступними міркуваннями. Відомо, що існує пряма кореляція між критерієм займання $W = n_F / (n_F - n_H)$ і співвідношенням числа атомів водню n_H і фтору n_F у молекулярній структурі речовини. Якщо критерій займання перевищує значення 0.7, то така речовина є пожежонебезпечною. У класі граничних вуглеводнів максимальне значення $W = 1$ досягається, коли всі атоми водню замінюються атомами фторопохідних. Підвищення термодинамічної ефективності холодильних циклів вимагає від робочих речовин достатньо високих критичних

температур, що відбраковує холодоагенти метанового і етанового рядків. Відбір холодоагентів з критичними температурами близькими до R12 і R22 і максимальним значенням критерію пожежонебезпеки обмежує клас можливих кандидатів такими компонентами: RC316 - 1,2-дихлор-1,2,3,3,4,4-гексафторциклобутан ($C_4Cl_2F_6$), RC317 - хлоргептафторциклобутан (C_4ClF_7) и RC318 - октафторциклобутан (C_4F_8). З економічної точки зору найбільш преференційний холодоагент – октафторциклобутан RC318, суміш якого з аміаком вивчається у роботі більш детально.

Для опису термодинамічної і фазової поведінки сумішей розглянута класична однорідна модель Пенга – Робінсона:

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2 + 2bv - v^2}, \quad (1)$$

$$a_{ij} = 0.45724R^2T_c^2 / P_c, \quad (2)$$

$$b_{ij} = 0.7780R T_c / P_c, \quad (3)$$

у якій структура рівняння стану для суміші залишається такою же, як і для чистої речовини, а параметри моделі a і b залежать від мольного складу x_i і x_j компонентів i і j , а також відповідних перехресних параметрів a_{ij} і b_{ij} для різних пар взаємодіючих молекул:

$$a = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 x_i x_j a_{ij}, \quad (4)$$

$$b = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j b_{ij}, \quad (5)$$

$$a_{ij} = (1 - k_{ij}) \sqrt{a_i a_j}, \quad (6)$$

$$b_{ij} = (1 - l_{ij}) \frac{b_{ii} + b_{jj}}{2}, \quad (7)$$

Для систем аміак – фторопохідні вуглеводнів аналізується можливість появи азеотропних станів і робиться висновок, що у переважної більшості сумішей повинно спостерігатися явище азеотропії. Загальна картина фазової поведінки сумішей аміаку із холодоагентами носить достатньо складний характер і охоплює практично всі відомі типи фазових рівноваг, які спостерігаються для бінарних систем. Для аналізу можливих типів фазової поведінки відповідно з класифікацією Скотта – ван Конінгенбурга була розглянута база даних про критичні параметри холодоагентів, яку ранжирували відповідно із стандартом ASHRAE.

Теоретично прогнозовано, що у сумішах аміаку із фторопохідними циклічними вуглеводнями повинна спостерігатися гетероазеотропія. Для практичних інженерних задач побудована діаграма ентальпія - тиск для суміші R717 – RC318. Розроблено метод оцінки термодинамічної ефективності парокомпресійних циклів маловивчених холодоагентів по критичних параметрах і температурі нормального кипіння з ціллю визначення селективних добавок, що покращують характеристики малих холодильних машин на основі сумішей аміаку. У таблиці 1 надані результати зіставлення показників ефективності холодильного циклу для систем кондиціювання повітря для основних конкуруючих холодоагентів.

Таблиця 1. Холодильний коефіцієнт (COP), відношення тисків випарник/конденсатор (Pr) і температура нагнітання (T_{out}) для різних холодоагентів

Холодоагент	COP	$Pr = P_{cond}/P_{ev}$	$T_{out}, ^\circ C$
R12	3.302	3.457	58 (70)
R22	3.245	3.419	72 (87)
R134a	3.197	3.880	57 (70)
R290	3.131	3.151	54 (64)
R600a	3.255	3.727	51 (57)
R410A	2.895	3.371	51 (51)
R717	3.456	4.063	111 (144)

Як витікає із приведених даних, висока енергетична ефективність аміаку супроводжується таким негативним фактором, як висока температура нагнітання (у дужках вказано значення T_{out} з урахуванням реальних втрат). З цієї причини, компенсуючі добавки шукали серед холодоагентів із низькими значеннями температури нагнітання. Підбір добавки до аміаку проводили на основі підходів до пошуку оптимальних робочих тіл, розвинутих в Академії холоду. Алгоритм зіставлення холодоагентів з урахуванням екологічних обмежень в умовах невизначеності був реалізований таким чином.

- Термодинамічні властивості і проектні характеристики парокомпресійного циклу для вибірки холодоагентів із бази даних визначали для заданих зовнішніх умов. Результати надавали у вигляді функціонального зв'язку «характеристика циклу – критичні параметри».
- Для кожного критерію серед усіх конкурентних холодоагентів обирали найкраще значення проектної характеристики k_p^0 . Набір “ідеальних” індексів k_p^0 обчислювали за допомогою термодинамічних властивостей і відомих співвідношень.
- На основі процедури «розмивання» критеріїв будували функції належності для цілей і обмежень. Оптимальне рішення шукали як результат перетину функцій приналежності для цілей і обмежень.

- Вибір остаточного рішення проводили з урахуванням обмеження на потенціал глобального потепління шляхом зіставлення конкуруючих холодоагентів із приблизно однаковими критичними параметрами.

Третій розділ присвячений експериментальному дослідженню фазових рівноваг суміші аміаку із пожежобезпечними добавками і визначенню меж безпечної роботи холодильної установки, пов'язаних із токсичністю та ризиком займання. Безпосередніх $P - V - T - x$ вимірювань суміші R717 - RC318 у відомій літературі за даними пошукових систем (SCIRUS, Google, Thermprop, Refprop, KDB, Detherm та інш.) не було виявлено. Оскільки суміш, яка розглядається, відноситься до числа систем із складною фазовою поведінкою, для розрахунку термодинамічної ефективності циклу, яка оцінюється холодильним коефіцієнтом, були уточнені параметри моделі рівнянь стану суміші. З цієї метою були проведені обмежені вимірювання фазових рівноваг даної суміші в інтервалі температур, які являють інтерес для застосування у холодильній техніці. Результати вимірювань фазових рівноваг були використані для ідентифікації моделей термодинамічних властивостей суміші R717 - RC318 і наступного обчислення енергетичних характеристик циклів холодильної машини. Оцінка збігання розрахункових параметрів з експериментальними даними з використанням всього об'єму одержаної інформації по фазових рівновагах показала, що середня похибка по тиску при заданих температурі і складі не перевищує у середньому 0.05 МПа і є типовою для кубічних рівнянь стану. Детальна картина фазової поведінки суміші при різних температурах була встановлена на основі термодинамічних розрахунків фазових рівноваг по однорідній моделі рівняння стану Пенга-Робінсона.

Адекватний опис експериментальних даних по фазових рівновагах для суміші, що розглядається, тільки на основі відомостей про енергетичний параметр бінарної взаємодії k_{12} з'явився неможливим. Тому знадобилося введення додаткового геометричного параметра l_{12} . Цільову функцію $\Phi(k_{12}, l_{12})$ мінімізували у вигляді:

$$\Phi = \sum_i \left| \frac{p_{b,i}^{calc}}{p_{b,i}^{exp}} - 1 \right|, \quad (8)$$

де $p_{b,i}^{calc}$ – розрахований тиск насичення, $p_{b,i}^{exp}$ – експериментальний тиск насичення. В результаті мінімізації виразу (8) були знайдені відповідні значення енергетичного і геометричного факторів $k_{12} = 0.11182$ і $l_{12} = -0.044$.

Одержані значення значно відхиляються від загальноприйнятих і свідчать про сильну неідеальність суміші. На рисунку 1 наведені ізотерми -20, 0, 35, 50°C, які охоплюють увесь діапазон параметрів стану, який являє інтерес для холодильної техніки. Оскільки рівняння стану безперервне, то воно описує всі стани, включаючи метастабільні. Щоб уникнути ускладнення картини на рис. 1 метастабільні стани не показано. Із рис. 1 видно, що суміш аміак із октафторциклобутаном є типово гетероазеотропною.

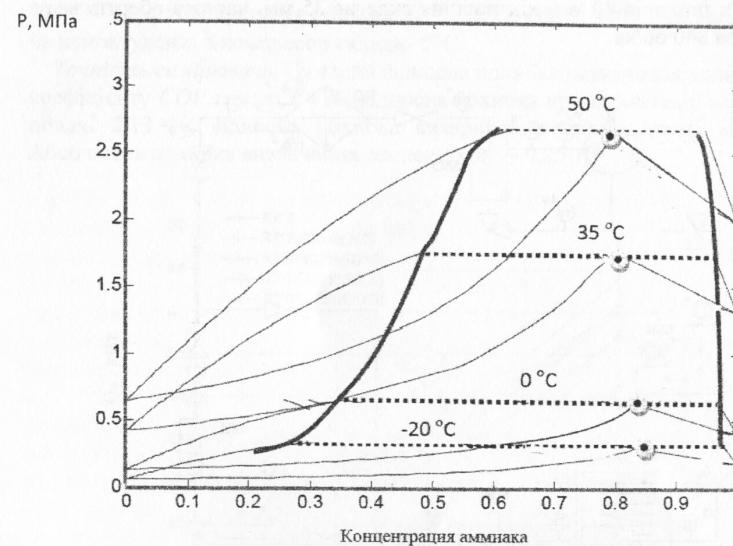


Рис. 1. Ізотерми суміші R717-RC318

Позначення: - трьохфазна лінія; — крива розчинності; ● - азеотропна точка (експериментальні дані)

Результати розрахунку критичної точки для азеотропного складу ($P_c = 4.72932$ МПа і $T_c = 367.214$ К). Суміш R717 - RC318 має обмежену взаємну розчинність і відноситься до гетероазеотропних систем, які при зміні тиску киплять при температурі більш низькій, ніж температури кипіння чистих компонентів при тому ж тиску. Загальний тиск пари двох існуючих фаз вище будь-якого із тисків пари чистих компонентів при такій же температурі. Експериментально встановлено, що нормальна температура кипіння для суміші R717/RC318 дорівнює мінус 38.6°C при співвідношенні концентрацій компонентів 7:1.

У четвертому розділі розглядали практичні аспекти використання нової композиції суміші R717 - RC318 у холодильних машинах і теплових насосах. Створено експериментальний стенд для дослідження холодопродуктивності компресорів і проведені вимірювання основних показників енергетичної ефективності робочого тіла на основі аміаку з добавкою пожежобезпечного компонента. Для досліджень компресора і роботи холодильної машини, в цілому, був спроектований калориметричний стенд (рисунок 2).

Стенд працює по повному циклу одноступеневої холодильної машини, з використанням калориметра із вторинним холодильним агентом. Головний об'єкт дослідження - компресор ФВ2А, який складається із 2 циліндрів, з

діаметрами поршнів 40 мм, хід поршня складає 35 мм, частота обертів валу компресора 840 об/хв.

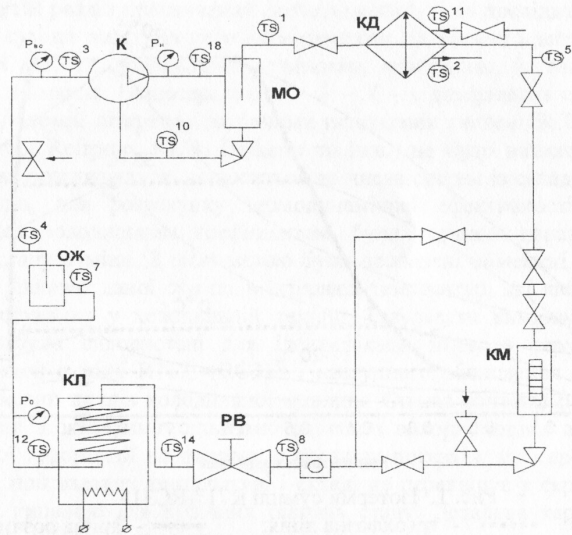


Рис. 2. Схема експериментального станду

Позначення: К - компресор, МО - маслявіддільник, КД - конденсатор, КМ - приладдя для визначення концентрації масла, РВ - регулюючий вентиль, КЛ - електрокалориметр, ОЖ - віддільник рідини, TS - теропари.

Експеримент проводили відповідно стандарту ISO 917. Електрична схема живлення дозволяла здійснювати ступінчасту зміну потужності, підведеної до вторинного холодильного агента. Чутливість автотрансформатора складала 5Вт. Вимірювання потужності електрокалориметра і електродвигуна компресора проводили з допомогою вимірювальних комплектів К-506. Стенд обладнаний системою контактів, які забезпечують підключення одночасно двох комплектів К-506 у ланцюг нагрівача калориметра та електродвигуна компресора. Температури холодильного агента і води виміряли теропарами. Тиск агента в системі і вторинного агента виміряли манометрами класу точності 0,6. Температуру навколишнього повітря - термометром з ціною шкали 0,5°C. У даній схемі станда був використаний водяний кожухотрубний конденсатор. Частоту обертання вала двигуна і компресора заміряли цифровим тахометром. Максимальна доза заправки системи по аміаку складала 600г у температурному режимі $T_k = 30^\circ\text{C}$, $T_0 = -10^\circ\text{C}$. Експеримент проводили на чистому аміаку і сумішах із різною масовою концентрацією RC318, таких як: 5, 10, 20, 30 масових %. Дослідження проводили при постійній температурі конденсації

$T_k = 30^\circ\text{C}$, и температурах кипіння $T_0 = -20^\circ\text{C}$; -30°C ; -40°C . Перегрів агента на всмоктуванні в компресор складав 5°C .

Точність вимірювань. Сумарна відносна похибка визначення холодильного коефіцієнту COP складала 3.4 %, відносна похибка при визначенні коефіцієнту подачі 2.13 %, відносна похибка вимірювання тиску складала менш 2%. Абсолютна похибка визначення температури $\sim 0.25 \cdot 10^{-2} \text{ K}$.

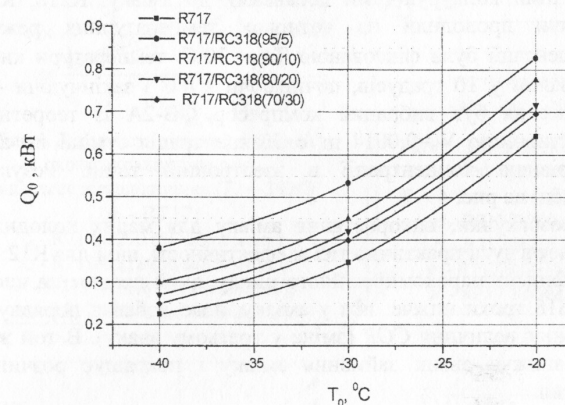


Рис. 3. Залежність холодопродуктивності від температури кипіння при $T_k = 30^\circ\text{C}$ для різних концентрацій

Аналіз експериментальних даних показав наступне. Добавка RC318 до аміаку, призводить до зростання холодопродуктивності порівняно із чистим агентом R717 (рис. 3). При концентрації 5мас.% RC318 у режимі $T_0 = -30^\circ\text{C}$ и $T_k = 30^\circ\text{C}$ зростання складає 54.8%. Одночасно спостерігається зростання потужності компресора, яка споживається. Максимальне зростання потужності порівняно з аміаком складало 64%, при концентрації 30 мас. % RC318 ($T_0 = -20^\circ\text{C}$, $T_k = 30^\circ\text{C}$).

Оцінюючи холодильний коефіцієнт, ми можемо зробити висновок, що суміш тільки з малими добавками RC318 (~5 мас. % RC318) має більше значення COP . Так, наприклад, у режимі $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_k = 30^\circ\text{C}$ COP вище ніж при роботі на чистому аміаку на 3.5%. Слід особливо відмітити роботу компресора на суміші з малими добавками RC318 (до 15 мас.%). Підвищення холодопродуктивності і COP , можна пояснити зростанням коефіцієнта подачі компресора, внаслідок зменшення ступені підвищення тиску у межах інтервалу концентрацій від 3 до 15 мас. % RC318. Так, при низьких температурах і тисках у широкій області концентрацій, при наявності зони обмеженої розчинності суміш кипить при постійній температурі.

В області високих тисків (температур), у нашому випадку температура конденсації близька 30°C , зона розшарування в області малих концентрацій RC318 відсутня і тиск суміші має проміжне значення у діапазоні від тиску чистого R717 до значень тиску азеотропного складу в залежності від концентрації RC318 (неазеотропна суміш). Ця область обмежена концентраціями 1 ... 15 мас. % .

Для оцінки перспективності системи, що розглядається, проводили зіставлення з іншими конкуруючими добавками до аміаку: R218, R290 і R600a. Розрахунки проводили на чотирьох температурних режимах: температура конденсації була фіксованою $T_k = 30^{\circ}\text{C}$, температури кипіння задавали з інтервалом у 10 градусів, починаючи з 0°C і закінчуючи -30°C . Об'єктом дослідження був вибраний компресор ФВ-2А із теоретичною об'ємною продуктивністю $V_h = 0.0014 \text{ m}^3/\text{с}$. Концентрація суміші по аміаку була вибрана рівною концентрації в азеотропній точці. Результати зіставлення наведені на рис. 4 – 7.

Як показали розрахунки, використання аміаку для малих холодильних систем дозволяє досягнути практично тієї ж ефективності, що і для R12. Хоча холодильний коефіцієнт парокомпресійного циклу, який працює на чистому холодоагенті RC318 трохи нижче, ніж у аміаку, його добавка порядку 10% практично не змінює величину COP (зміна у третьому знаку). В той же час добавка RC318 знижує ризик займання аміаку і покращує розчинність традиційних мастил.

При однакових умовах енергетичні характеристики аміачних компресорів вище, ніж для систем на R407C і R134a. Для теоретичного циклу одноступеневої холодильної машини, що працює в режимі теплового насоса в діапазоні температур -5°C ... 50°C із ізентропним адіабатичним стискуванням, без перегріву або переохолодження на всмоктуванні, ККД (коефіцієнт корисної дії) аміачного циклу на 7-11% вище, ніж циклів на R407C і R134a. У реальних системах різниця буде ще більше, внаслідок сприятливих теплофізичних властивостей аміаку. До них належать більш крута крива «температура насичення – тиск», більш високе значення коефіцієнтів тепловіддачі і ККД компресора. При низьких ступенях стискування аміачні компресори істотно кращі компресорів на HFC, хоча при високих ступенях стискування реалізуються близькі значення ККД компресора.

Для надійної роботи компресора, доцільно здійснити такі заходи, як

- покращення систем тепловідведення при низькій температурі,
- використання високотемпературних джерел теплоти,
- збільшення поверхні випарника і конденсатора,
- робота випарника в затопленому режимі, використання коротких і добре ізольованих ліній всмоктування,

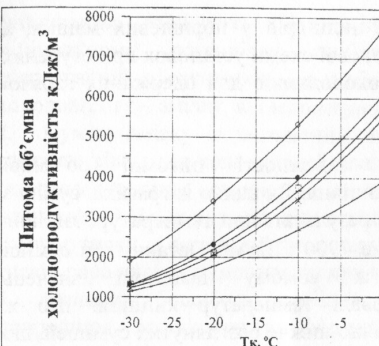


Рис. 4. Залежність питомої об'ємної холодопродуктивності від температури кипіння ($T_k = 303\text{K}$) + R717;

- - R717/R290 (55 моль/моль);
- - R717/R218 (50 моль/моль);
- - R717/RC318 (60 моль/моль);
- × - R717/R600a (65 моль/моль).

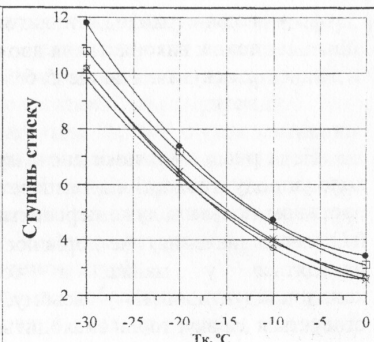


Рис. 5. Залежність ступеню стиску від температури кипіння $T_k = 303\text{K}$ + R717;

- - R717/R290 (55 моль/моль);
- - R717/R218 (50 моль/моль);
- - R717/RC318 (60 моль/моль);
- × - R717/R600a (65 моль/моль).

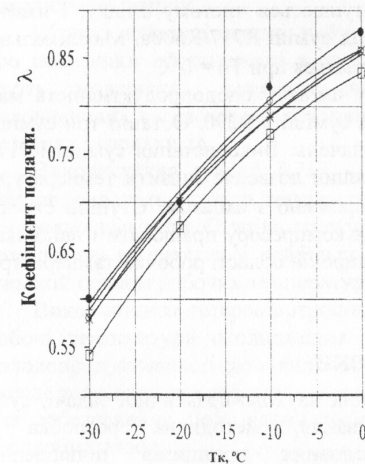


Рис. 6. Залежність коефіцієнту подачі від температури кипіння $T_k = 303\text{K}$ + R717;

- - R717/R290 (55 моль/моль);
- - R717/R218 (50 моль/моль);
- - R717/RC318 (60 моль/моль);
- × - R717/R600a (65 моль/моль).

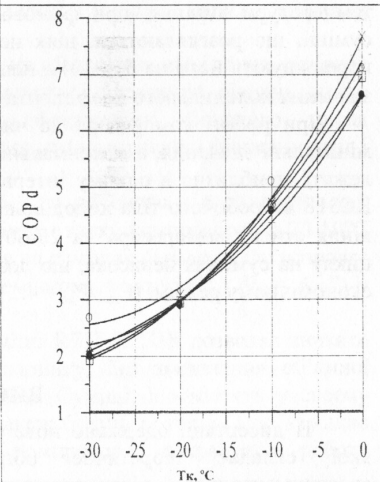


Рис. 7. Залежність холодильного коефіцієнта (COP_d) від температури кипіння ($T_k = 303\text{K}$) + R717;

- - R717/R290 (55 моль/моль);
- - R717/R218 (50 моль/моль);
- - R717/RC318 (60 моль/моль);
- × - R717/R600a (65 моль/моль).

- водяне охолодження головок циліндрів у поршневих машин, а також використання двохступеневої схеми установок при ступенях стискування вище 5-6 і пароохолодників для одержання гарячої води.

На рис. 4 показано графік залежності питомої об'ємної холодопродуктивності від температури кипіння. Як видно із графіка, суміш з пропаном показала дуже перспективний результат: при температурі кипіння 0°C має значення, яке дорівнює майже 7900 кДж/м^3 . Останні три суміші знаходяться у майже в тому ж самому діапазоні значень холодопродуктивності у всьому інтервалі температур кипіння. Що ж стосується аміаку, то він знаходиться значно нижче розглянутих сумішей, що є очевидним. На рис. 5 показана залежність ступеню стиску в компресорі від температури кипіння. Ступінь стиску лежить в інтервалі 2,5 ~ 12. Найбільші значення спостерігаються у сумішах з RC318 і R218 на всьому інтервалі температур кипіння. На рис. 6 наведена залежність коефіцієнта подачі від температури кипіння. Всі коефіцієнти лежать у межі 0,53 ~ 0,88, при цьому значення коливаються у межах 4%. Для суміші з RC318 він має мінімальне значення. На рис. 7 показано графік залежності холодильного коефіцієнта від температури кипіння, при фіксованій температурі конденсації. Як видно, суміші, що розглядаються, ніяк не поступаються чистому аміаку, і навіть перевищують його на 5 ~ 10%, наприклад суміш R717/R600a. Максимальне значення холодильного коефіцієнта досягається при $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$.

При роботі компресора на чистому аміаку холодопродуктивність має мінімальні значення, а максимальні – на суміші з R290. Останні три суміші лежать приблизно в одному інтервалі значень. Використання суміші R717-RC318 як робочого тіла холодильних машин дозволяє знизити температуру кінця стиску компресора на $20-60^{\circ}\text{C}$ порівняно з аміаком. Ступінь стиску циклу на сумішах невисока, що дозволяє компресору працювати в найбільш економічному режимі ($P_{\text{наг}}/P_{\text{вс}} = 4...7$) у широкій області робочих температур.

ВИСНОВКИ

В дисертації одержано нове рішення науково-практичної задачі, суть якої складає теоретичне обґрунтування, методична розробка і експериментальне підтвердження основних принципів підвищення ефективності малих холодильних машин на основі створення бінарних робочих тіл, що відповідають концепції сталого розвитку холодильної техніки.

На основі проведеного дослідження сформульовані такі головні висновки:

1. Один із перспективних шляхів до розробки холодоагентів четвертого покоління, що відповідає концепції сталого розвитку (мінімальному

руйнуванню озонового шару, мінімальному часу життя в атмосфері, мінімальному потенціалу глобального потепління і максимальній енергетичній ефективності), є підбір селективних добавок до природного холодоагенту – аміаку, які мінімізують його негативні характеристики.

2. Суміш аміаку із негорючим холодоагентом RC318 є перспективним робочим тілом для холодильної техніки, завдяки наявності у таких системах гетероазеотропних станів, коли при зміні тиску суміш кипить при температурі більш низькій, ніж температури кипіння чистих компонентів при тому ж тиску, а загальний тиск пари двох існуючих фаз вище будь-якого із тисків пара чистих компонентів при тій же температурі.

3. Основна більшість сумішей аміаку з добавками синтетичних і природних холодоагентів формує широкий спектр явищ азеотропії (гомоазеотропія, гетероазеотропія, негативна і позитивна азеотропія, подвійна азеотропія), що робить їх перспективними для здійснення процесів теплопередачі у конденсаторах і випарниках із-за відсутності температурного ковзання, як і в чистих речовинах.

4. Однорідинна модель Пенга – Робінсона для двохкомпонентної системи дозволяє описати широку різноманітність фазових рівноваг, які спостерігаються у суміші R717/RC318 і побудувати діаграму тиск – ентальпія для оцінки термодинамічної ефективності циклів малих аміачних холодильних машин.

5. Штучні нейронні мережі, побудовані на обмежених навчаючих вибірках про показники ефективності зворотних циклів і параметри рівнянь стану, дають можливість провести аналіз ефективності більшого числа маловивчених холодоагентів без проведення дороговартісних експериментів і складних розрахунків.

6. Використання суміші R717 - RC318 як робочого тіла холодильних машин дозволить знизити температуру кінця стиску компресора на $20-80^{\circ}\text{C}$ порівняно з аміаком. Ступінь стиску циклу на сумішах невисока, що дозволяє компресору працювати у найбільш економічному режимі ($P_{\text{наг}}/P_{\text{вс}} = 4...7$) у широкій області робочих температур.

7. Використання гетероазеотропної суміші R717-RC318 дозволяє знизити робочі температури охолодження у випарнику, без зменшення об'ємної холодопродуктивності холодильної машини. Суміші, що містять у своєму складі речовину, яка розчинна у маслі, також будуть розчинні, що важливо для забезпечення повернення масла у компресор і покращення роботи теплообмінників.

8. Прийняття рішення про використання малих аміачних систем замість установок із холодоагентами, що містять фтор(хлор)вуглеводні, з чисто технічної і економічної точок зору може бути досягнуто не на основі вже існуючих установок, а на нових холодильних системах, адаптованих до нових робочих тіл.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Оценка пожароопасности новых хладагентов: зб. наук. праць [«Сучасні проблеми холодильної техніки й технології»] / М-во освіти і науки України, Одес. Держ. Академія холоду. – Одеса: ОДАХ, 2005. – 134с. (Спецвип.: додаток до журналу «Холодильна техніка і технологія»)).
2. Анализ цикла каскадной холодильной машины использующий смеси холодильных агентов: зб. наук. праць [«Промисловий холод і аміак»] / М-во освіти і науки України, Одес. держ. академія холоду. – Одеса: ОДАХ, 2006. – 109с. (Спецвип.: додаток до журналу «Холодильна техніка і технологія»)).
3. Фазовые равновесия и азеотропные состояния в смесях аммиака с HFC и HC с хладагентами. Зб. наук. праць [«Сучасні проблеми холодильної техніки й технології»] / М-во освіти і науки України, Одес. Держ. Академія холоду. – Одеса: ОДАХ, 2007. – 162с. (Спецвип.: додаток до журналу «Холодильна техніка і технологія»)).
4. Characterization of a reciprocated compressor working with azeotropic blends of alternative and natural refrigerants: Proc. 6-th international conference [“Compressors – 2006”], (Papiernicka, Slovak Republic, 2006) / International Institute of Refrigeration – S.: IIR, 2006. – 397p.
5. Применение смесей природных холодильных агентов в холодильной технике: материалы конференции [«Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке»] / 13-15 ноября 2007 г., Санкт-Петербург, Россия. – С.-П.: СПбГУНИИТ, 2007. – 879с.
6. Analysis of cycle of cascade refrigeration machine with using mixtures of refrigeration fluids: proc. international conference [“Ammonia Refrigeration Technology for Today and Tomorrow”], (April 19 – 21, Ohrid, Republic of Macedonia, 2007) / International Institute of Refrigeration – S.: IIR, 2007.
7. Global phase behavior and cycle performance of the ammonia – industrial refrigerant blends: Proc. 8-th international conference [“Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids”], (September 7-10, 2008 Copenhagen, Denmark) / International Institute of Refrigeration – S.: IIR, 2008. – p.1142-1150.
8. Хмельнюк М.Г. Стандарт токсичности и горючести для рабочих тел холодильных машин / М.Г.Хмельнюк, В.А.Чепурненко // Холодильна техніка і технологія: Наук. техн. жур. – Одеса: ОДАХ, 2005. - №4(96). – с.41- 42.
9. Хмельнюк М.Г. Оценка пожароопасности хладагентов/ М.Г.Хмельнюк, В.А.Чепурненко // Холодильна техніка і технологія: Наук. техн. жур. – Одеса: ОДАХ, 2005. - №6(98). – С.13-16.
10. Хмельнюк М.Г. Исследование компрессора, работающего на азеотропных смесях холодильных агентов / М.Г.Хмельнюк, В.А.Чепурненко // Холодильна техніка і технологія: Наук. техн. жур. – Одеса: ОДАХ, 2006. - №2(100). – С.8-12.
11. Артёмов С.В. Термодинамическая эффективность парокомпрессионных циклов, работающих на бинарной смеси R717(NH₃)-R318(C₄F₈)/ С.В. Артёмов, В.А.Чепурненко, Е.Н.Корба, М.Г.Хмельнюк //

- Холодильна техніка і технологія: Наук. техн. жур. – Одеса: ОДАХ, 2008. - №1(111). – С.15-22.
12. Хмельнюк М.Г. Смесь аммиак/октафторциклобутан (R717/R318) – новое рабочее тело холодильных машин / М.Г.Хмельнюк, В.А.Чепурненко, С.В.Артеменко // Холодильна техніка і технологія: Наук. техн. жур. – Одеса: ОДАХ, 2008. - №3(113). – С.39-43.
 13. Хмельнюк М.Г. Експериментальне дослідження компресора ФВ2А на суміші R717/ R600А / М.Г.Хмельнюк, В.О.Шевченко, В.А.Чепурненко // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонДУЕТ, 2008.- Вип.19. – С.95-101.
 14. Чепурненко В.А. Исследование смеси аммиака с октафторциклобутаном как рабочего тела холодильных машин / В.А.Чепурненко, С.В.Артёмов, М.Г.Хмельнюк // Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. – 2008. - №32. – С.321-325.

Особистий внесок автора в роботах, виконаних у співавторстві:

[1, 8, 9] - аналіз літературних джерел щодо стандартів токсичності і горючості холодоагентів; [10, 12-14] - розробка методики проведення експерименту та участь в експериментальному дослідженні компресора, аналіз та узагальнення отриманих результатів; [2-7, 11] - аналіз та узагальнення отриманих результатів, формування висновків.

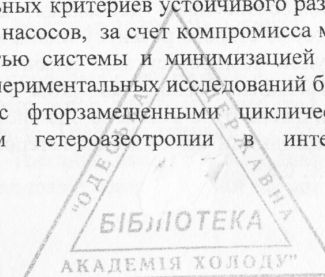
АННОТАЦІЯ

Чепурненко В.А. Повышение эффективности работы малых холодильных машин на основе смесей аммиак - фторпроизводные углеводороды.- Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. - Одесская государственная академия холода. Одесса, 2008

В диссертации представлены результаты исследований по повышению эффективности малых холодильных машин на основе смеси аммиака с фторпроизводными углеводородов. Разработана стратегия поиска азеотропных композиций аммиака с пожаробезопасными добавками, обеспечивающая достижение рациональных критериев устойчивого развития малых холодильных машин и тепловых насосов, за счет компромисса между высокой энергетической эффективностью системы и минимизацией риска воспламенения смеси. В результате экспериментальных исследований было обнаружено, что системы аммиака с фторзамещенными циклическими углеводородами обладают явлением гетероазеотропии в интервале концентраций аммиака 0.7 ... 0.8.

xv1322
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОДАХТ
БІБЛІОТЕКА



Разработаны адекватные математические модели термодинамического и фазового поведения систем аммиак – фторзамещенные циклические углеводороды на основе одножидкостных уравнений состояния Пенга – Робинсона для смеси и построены диаграммы состояния давление – энтальпия для азеотропных концентраций. Проведен анализ термодинамической эффективности и показаны преимущества пожаробезопасных композиций аммиака с RC318 по сравнению с традиционными промышленными хладагентами, которые используются в малых холодильных машинах и тепловых насосах. Экспериментальные исследования ранее неизученных нижних пределов воспламенения смесей аммиака с фторпроизводными углеводородами позволили установить рациональные соотношения концентраций, обеспечивающие сочетание достаточно высокой энергетической эффективности и минимальной пожароопасности.

Проведено экспериментальное исследование холодопроизводительности компрессоров, работающих на смесях аммиак – фторпроизводные углеводороды, и осуществлен оптимальный выбор композиции смеси на основе разработанной математической модели энергетической эффективности холодильной системы за пределы параметров состояния, изученных в ограниченном числе опытов. В работе разработаны рекомендации по практическому использованию смеси аммиак – C318, что представляет значительный интерес для маркетингового продвижения предлагаемого хладагента.

Ключевые слова: малые холодильные машины, устойчивое развитие, смеси хладагентов, R717 – RC318, энергетическая эффективность

АНОТАЦІЯ

Чепурненко В.А. Підвищення ефективності роботи малих холодильних машин на базі сумішей аміак – фторопохідні вуглеводні - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. Одеська державна академія холоду. – Одеса, 2008. В дисертації подано результати досліджень по підвищенню ефективності малих холодильних машин на основі суміші аміаку із фторопохідними вуглеводнів. Розроблена стратегія пошуку азеотропних композицій аміаку із пожежобезпечними добавками, яка забезпечує досягнення раціональних критеріїв сталого розвитку малих холодильних машин і теплових насосів, за рахунок компромісу між високою енергетичною ефективністю системи і мінімізацією ризику займання суміші. В результаті експериментальних досліджень було виявлено, що системи аміаку і фторопохідними циклічними вуглеводнями мають явище гетероазеотропії в інтервалі концентрацій аміаку 0.7 ... 0.8.

Розроблені адекватні математичні моделі термодинамічної і фазової поведінки систем аміак – фторопохідні циклічні вуглеводні на основі однорідних рівнянь стану Пенга – Робінсона для суміші і побудовані діаграми стану тиск – ентальпія для азеотропних концентрацій. Проведено аналіз термодинамічної ефективності і показано переваги пожежобезпечних композицій аміаку із RC318 порівняно із традиційними промисловими холодоагентами, які використовуються у малих холодильних машинах і теплових насосах. Експериментальні дослідження раніше невивчених нижніх меж займання сумішей аміаку із фторопохідними вуглеводнями дозволили встановити раціональні співвідношення концентрацій, що забезпечують сполучення достатньо високої енергетичної ефективності і мінімальної пожежонебезпеки.

Проведено експериментальне дослідження холодопродуктивності компресорів, які працюють на сумішах аміак – фторопохідні вуглеводні, і здійснено оптимальний вибір композиції суміші на основі розробленої математичної моделі енергетичної ефективності холодильної системи за межі параметрів стану, вивчених у обмеженому числі випробувань. В роботі розроблено рекомендації з практичного використання суміші аміак – C318, що являє значний інтерес для маркетингового просування пропонованого холодоагенту.

Ключові слова: малі холодильні машини, сталий розвиток, суміші холодоагентів, R717 – RC318, енергетична ефективність.

ABSTRACT

Chepurnenko V.A. Efficiency enhancement of small refrigerating machines on the base of ammonia – HFCs blends. – Manuscript.

Thesis for a candidate of science (engineering) degree by specialty 05.05.14 – Refrigerating, Vacuum, and Compressor Techniques, Conditioning Systems. Odessa State Academy of Refrigeration. Odessa, 2008.

The research results on the efficiency enhancement efficiency enhancement of small refrigerating machines on the base of ammonia – HFCs blends are presented. The search strategy of azeotropic compositions in ammonia – nonflammable refrigerant blends as a result of compromise between high energy efficiency and low flammability is developed on the base of sustainable development criteria. It was shown that the ammonia – fluorine substituted cyclic hydrocarbons blends are exhibited an heteroazeotropy phenomenon in the concentration ammonia range 0.7 ... 0.8.

Accurate mathematical models of thermodynamic and phase behavior for the ammonia – fluorine substituted cyclic hydrocarbon blends are developed on the base of the Peng-Robinson equation of state. Diagrams pressure – enthalpy for azeotropic mixture compositions are built. Thermodynamic efficiency analysis has been carried out and the advantages nonflammable compositions of the ammonia -

RC318 blend is clearly demonstrated in comparison with conventional industrial refrigerants that are used in refrigeration and heat pump applications. The trade off concentrations which meet high energy efficiency and low flammability were established.

The cooling capacity of compressors working on the ammonia - fluorocarbon derivative mixtures was studied experimentally and optimal composition was chosen on the base mathematical models beyond state parameters investigated in the restricted tests. Recommendations concerning the practical aspects of exploitation of refrigeration units working on the ammonia - RC318 mixture are given. This information is useful for market promotion of proposed blend.

Key words: *small refrigerating machines, sustainable development, refrigerant blends, R717 – RC318, energy efficiency*

