

АВТОРЕФ
Х65

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

ХМЕЛЬНЮК МИХАЙЛО ГЕОРГІЙОВИЧ

УДК 621.564:641.546.44

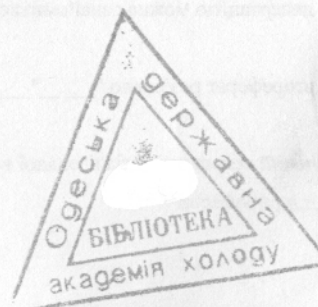
**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ
МАЛИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН
(АЛЬТЕРНАТИВНІ ХОЛОДОАГЕНТИ, СХЕМНІ РІШЕННЯ)**

Спеціальність 05.05.14 – Холодильна та кріогенна техніка,
системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса - 2003



Дисертація є рукопис.

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

Науковий консультант – заслужений діяч науки і техніки України,

д.т.н., професор Г.К. Лавренченко.

Офіційні опоненти:

д.т.н., професор **Геллер Володимир Зіновійович**,
завідувач кафедрою Одеської національної академії
харчових технологій МОН України;

д.т.н., професор **Дорошенко Олександр Вікторович**,
директор НВО "Нові технології" Мінагропрому України;

д.т.н., професор **Осокін Володимир Васильович**,
завідувач кафедрою Донецького державного університету
економіки і торгівлі ім.М.Туган-Барановського МОН України.

Провідна організація: **НДІ «Шторм»** Міністерства промислової політики України, м.Одеса

Захист дисертації відбудеться « 24 » листопада 2003 р. о 11³⁰ год. в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.087.01 при Одеській державній академії холоду за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65026.

Дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОДАХ

2003 р.

занов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Малі холодильні машини (МХМ), створені на основі герметичних компресорів, відносяться до найбільш масової продукції холодильного машинобудування. У їх числі - агрегати побутових холодильників і морозильників, МХМ торгівлі, суспільного харчування і систем кондиціонування повітря. Побутові холодильні прилади щорічно споживають близько 5 млрд. кВтг електроенергії. В Україні експлуатується близько 10 млн. холодильників, що є недостатньо високим показником у порівнянні з розвитими країнами. Прагнення до досягнення світових стандартів веде до збільшення кількості побутових холодильних приладів і агрегатів як за рахунок випуску вітчизняних МХМ, так і холодильного устаткування, що надходить по імпорту. Одночасно змінюється номенклатура МХМ. Так, серед побутових приладів підвищується частка енергоємних багатокамерних холодильників з однокомпресорними агрегатами. Збільшується також кількість МХМ великої холодопродуктивності, використовуваних в інших областях і, як наслідок, росте їхнє загальне енергоспоживання.

У зв'язку з цим серйозною проблемою стає пошук і реалізація науково-обґрунтованих рекомендацій, які знизили б темпи росту енергоспоживання на тлі щорічно зростаючого числа МХМ. Збільшення загального енергоспоживання МХМ у цій ситуації можна стримувати двома способами: по-перше, за рахунок випуску енергоекономічного устаткування; по-друге, організацією такого сервісного обслуговування, при якому буде досягнутий поступовий переклад існуючих МХМ на нові ефективні холодоагенти, альтернативні озоноруйнуючим холодоагентам R12, R22 і R502. Однак такі підходи потребують більш детальної конкретизації та пошуку нових рішень, що можуть дати найбільш істотні результати. У таких дослідженнях і розробках слід враховувати вимоги Монреальського (1987р.) і Кіотського (1997р.) Протоколів, що забороняють застосування озоноруйнуючих речовин і регламентують емісію парникових газів.

Можливе рішення енергетичних і екологічних проблем у побутовій холодильній техніці, як показує аналіз нинішньої ситуації і перспектив розвитку галузі, укрупнено зводиться до наступного:

1. Пошуку ефективних схем і конструкцій однокомпресорних агрегатів двох - і трьохкамерних холодильників, у яких основна втрата від необоротності обумовлена виробництвом холоду при нижчій з температур охолодження.
2. Розробці для сервісу існуючих холодильників бінарних азеотропних холодоагентів, що не поступаються по ефективності R12 і альтернативному холодоагенту R134a, а також сумісних з мінеральними і синтетичними мастилами, що зарекомендували себе у практичній експлуатації.

xv1328

ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ

3. Створенню нових ефективних багатокомпонентних робочих тіл для заміни традиційних холодоагентів як R22 і R502, що використовуються як основні робочі тіла МХМ, які випускаються чи експлуатуються на цей час.

Таким чином, рішення проблеми удосконалення МХМ повинне проводитись в тісному зв'язку, з одного боку, з розробкою ефективних багатокомпонентних робочих тіл, а, з іншого, з формуванням раціональних схем і конструкцій, що найбільш повно враховують особливості термодинамічної поведінки властивостей альтернативних робочих тіл, у тому числі і чистих речовин.

Пошук нових - енергетично ефективних, екологічно безпечних і економічно прийнятних робочих тіл, поряд з формуванням раціональних схем і конструкцій МХМ, роблять *актуальними* дослідження, що вирішують *важливу народногосподарську задачу* вдосконалення малих холодильних машин для температурного діапазону охолодження 240...280 К.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота виконувалася в рамках програми фундаментальних і пошукових досліджень Державного комітету з науки і техніки ЦРСР №555 від 30.10.85м; а також у виконання Постанови Кабінету Міністрів України №1274 від 17.10.96 р., що затвердила "Програму припинення виробництва та використання озоноруйнуючих речовин до 2000р."; Постанови Верховної Ради України " Про енергозбереження"; Постанови Кабінету Міністрів України №148 від 5.02.97 р про "Комплексну державну програму енергозбереження". Дослідження з даної роботи велися в ході виконання госпдоговірних і держбюджетних робіт (номера держ. реєстрації: 0197U010043, 0195U006478, 0194U001346, 0190U029858, 0194U009650, 01860027627, 01840014605, 01910036713, 01900019379 01890041165) між Одеською державною академією холоду і НДІ "ВЕСТА" (м. Київ), АТ "НОРД" (м. Донецьк), у яких використовувалися отримані в роботі дані для науково обґрунтованої модернізації і випуску холодильного устаткування.

Мета і задачі досліджень. Мета дослідження складається в розробці науково-технічних основ вдосконалення малих холодильних машин, що працюють в інтервалі температур охолодження 240...280 °С, на основі спрямованого пошуку і дослідження нових, альтернативних R12, R22 і R502, багатокомпонентних озонобезпечних фторвуглеводнів шляхом їхньої модифікації природними холодоагентами і створення нових схемних рішень агрегатів МХМ.

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

1. Пошук багатокомпонентних холодоагентів, що забезпечують компроміс між енергетичною ефективністю та екологічною безпекою при експлуатації і сервісному обслуговуванні МХМ.
2. Математичне моделювання та експериментальна верифікація термодинамічних властивостей і фазових рівноваг (рідина-пара і рідина - рідина - пар) запропонованих багатокомпонентних робочих тіл.

3. Термодинамічний аналіз циклів і нових схемних рішень для різних класів холодильних машин, що працюють на сумішах речовин.
4. Створення обчислювальних алгоритмів і програм розрахунку показників енергетичної ефективності, екологічної безпеки та економічної доцільності для компромісного вибору компонентного складу альтернативних холодоагентів.
5. Аналіз взаємодії існуючих компресорних мастил з новими багатокомпонентними робочими тілами і вивчення можливостей застосування в сервісному обслуговуванні процедури "drop in", коли проводиться тільки заміна озоноруйнуючих речовин, у порівнянні з ретрофітом (retrofit) холодильного устаткування, де заміні підлягають холодоагент і мастило.
6. Створення і дослідження нових схемних рішень для агрегатів малих холодильних машин зі зменшенням енергоспоживанням.
7. Проведення натурних іспитів холодильного устаткування на нових багатокомпонентних робочих тілах, розроблених для заміни R12, R22 і R502.

Рішення сформульованих задач досягнуто в рамках наступних **методів дослідження**: експериментальних досліджень фазових рівноваг сумішей холодильних агентів; експериментальних досліджень роботи холодильних машин і агрегатів; теоретичних досліджень, спрямованих на створення рівнянь стану з метою розрахунку таблиць по теплофізическим властивостях для розроблених робочих тіл; розробки нових робочих тіл і схемних рішень агрегатів малих холодильних машин; розробки на базі даних по калориметруванню, математичних моделей герметичних компресорів

Конкретними **об'єктами дослідження** є багатокомпонентні холодоагенти, різні схемні рішення і типи малих холодильних машин.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертації захищаються наступні *нові наукові положення*:

1. Цілеспрямована модифікація озонобезпечних фторвуглеводневих холодоагентів природними вуглеводневими компонентами є діючим засобом створення нового класу альтернативних азеотропних робочих тіл у холодильній техніці і дозволяє:
 - забезпечити екологічну безпеку за рахунок зниження потенціалів глобального потепління і руйнування озонового слою;
 - збільшити енергетичну ефективність циклів компресорних холодильних машин при одночасному зменшенні маси холодоагенту, що заправляється;
 - використовувати більш дешеві компоненти в сервісному обслуговуванні холодильного устаткування без заміни мінеральних мастил на більш дорогі сорти синтетичних мастил.
2. Азеотропні суміші R218/R152a/R600a (RA), R218/R134a/R600a (RB), R218/R134a/R290 (RB1), R134a/R600a (RC), R152a/R600a (RD), R290/R218 (RE) є енергетично ефективними і

озонобезпечними робочими тілами, що дозволяє розглядати їх як альтернативу для заміни R12, R22 і R502.

3. Введення в схеми малих холодильних машин ежектора, що використовує перепад тисків між високо- і низькотемпературними випарниками для додаткового стиску холодоагенту перед його усмоктуванням у компресор, дозволяє підвищити ефективність дійсних однокомпресорних термодинамічних циклів двухтемпературного охолодження.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень і результатів визначаються:

- коректною постановкою задач та перевіркою адекватності теоретичних моделей і експериментальних даних;
- використанням сучасних математичних методів прийняття компромісних рішень в умовах невизначеності та їхньою реалізацією при аналізі багатокритеріальних задач вибору альтернативних робочих тіл малих холодильних машин;
- докладними експериментальними доказами запропонованих технічних рішень по збільшенню енергетичної ефективності циклів холодильних машин;
- альтернативними багатоконфінентними робочими тілами для малих холодильних машин, новизна яких підтверджена вітчизняними і закордонними патентами;
- оригінальними схемними рішеннями агрегатів холодильних машин, новизна яких підтверджена вітчизняними патентами.

Практична цінність отриманих результатів. У ході досліджень термодинамічних властивостей сумішей, енергетичних характеристик циклів, герметичних компресорів і холодильних приладів отримано великий експериментальний і розрахунковий матеріал, що дозволяє рекомендувати нові озонобезпечні ефективні робочі тіла для заміни R12, R22 і R502 у малих холодильних машинах. Впровадження в промисловість розроблених за участю автора таких холодоагентів, як RC, RD, RA, RB, RB1, RE та інших буде сприяти реалізації Україною прийнятих зобов'язань по дотриманню положень Монреальського Протоколу. Запропоновані схемні рішення агрегатів холодильних машин дозволяють створювати моделі побутової техніки зі зменшенням енергоспоживанням. Проведені автором дослідження дозволяють скоротити обсяг і терміни коштовних експериментальних досліджень. Дані по термодинамічних властивостях альтернативних робочих тіл, а також матеріали проведених експериментальних досліджень енергетичних характеристик компресорів і холодильних приладів передані для використання і впровадження в КНПО "ВЕСТА", м. Київ; ДМЗ, м. Дніпропетровськ; АТ "НОРД", ЗОТ Донецький інститут холодної техніки; НВО "ОРИОН", м. Одеса; ВО "Одесхолодмаш", Кишинівський завод холодильників та ін. Впровадження в практику результатів робіт буде спрямовано на практичну реалізацію постанови КМ України №148 від 5.02.97 р., що затвердив "Комплексну державну програму енергозбереження" і закону України "Про енергозбереження".

Особистий внесок автора підтверджено 4-ма самостійними науковими публікаціями, у яких відбито головні ідеї і положення теоретичних розробок і експериментальних результатів. Здобувачем створені експериментальні установки для дослідження теплофізичних властивостей холодоагентів та їхніх сумішей; розроблено уніфікований стенд для проведення калориметричних досліджень компресорів, агрегатів і різних схемних рішень холодильних машин; обґрунтовано вибір об'єктів дослідження і складена методика їхнього вивчення; виконано виміри фазових рівноваг, калориметрія різних холодильних машин і агрегатів, а також запропоновані нові ефективні робочі тіла. Ряд наукових результатів отримано у співробітництві з к.т.н. Єгоровим А.В. - експериментальне дослідження фазових рівноваг; м.н.с. Серебрянським П.В. - калориметрирування холодильних машин і агрегатів; к.т.н. Рувинським Г.Я. - розробка рівнянь стану. Визначений внесок у розробку принципів формування ефективних багатоконфінентних робочих тіл для холодної і криогенного устаткування вніс науковий консультант д.т.н., професор Лавренченко Г.К.

Особистий внесок автора в дослідження, виконані у співавторстві:

[10, 40-45,] - постановка задачі, аналіз і основні висновки;

[1-4, 8, 12, 14-16, 19, 26-30] - проведення експерименту, розробка методик, аналіз результатів;

[5, 7, 13, 17-18, 20, 25] - аналіз результатів і висновки;

[6, 9, 11, 31-39] - принципові ідеї.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, результати і висновки дисертації викладені в 30 статтях, опублікованих у періодичних професійних журналах і збірниках наукових праць, що відповідають вимогам ВАК України; 36 робіт представлені у вигляді доповідей і тез доповідей у збірниках наукових праць регіональних і міжнародних конференцій; 6 робіт депоновано; 9 патентів підтверджують технічну новизну об'єктів, розроблених при виконанні даної роботи.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти глав, основних висновків, списку використаної літератури, що включає 279 джерел, і додатків. У ній міститься 251 сторінок основного тексту, 104 таблиці і 113 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі відбита актуальність теми дисертації, показаний зв'язок з державними програмами, сформульовані мета і задачі дослідження. Приведено нові наукові положення, конкретний особистий внесок автора, відомості про апробацію результатів дисертації і публікації по темі дисертації.

Перший розділ присвячений розгляду основних проблем і принципів вибору перспективних екологічно безпечних робочих тіл холодильних машин. Аналіз літературних джерел і прогноз найбільш ймовірних сценаріїв заміни озоноруйнуючих робочих тіл показав, що в даний час існують дві принципові можливості підбору сумішей, що задовольняють екологічним вимогам:

- повернутися до класичних природних холодоагентів - аміаку, воді, діоксиду вуглецю і вуглеводням, поставивши як кінцеву мету усунення озоноруйнуючих речовин з холодильної техніки;
- зменшити небезпеку від використання нового сімейства альтернативних холодоагентів – фторвуглеводнів (R32, R134a, R125), у яких спостерігається ненульовий потенціал глобального потепління, за рахунок добавок природних компонентів, як проміжну мету.

Безліч критеріїв вибору (екологічних і енергетичних, економічних і експлуатаційних) не дозволяє однозначно віддати перевагу одній речовині. Тому необхідно приймати рішення, що відбиває компроміс між перерахованими вище критеріями. В даний час є загальноприйнятим, що в новому холодильному обладнанні використовують озонобезпечний холодоагент R134a у сполученні із синтетичними мастилами. Однак застосування R134a у стаціонарних торгових холодильних установках, де температура охолоджуваного об'єкта підтримується нижче мінус 25 °C, недоцільно через його низьку холодопродуктивність. Крім того, існує холодинне устаткування на R12 використовує більш дешеві мінеральні мастила, які при заміні на синтетичні не вдається цілком видалити із системи, що приводить до значних проблем при експлуатації. Тому застосування процедури "drop in", коли проводиться тільки заміна холодоагенту, більш переважно в порівнянні з ретрофітом (retrofit), де заміні підлягають і холодоагент і мастило. Для побутової холодильної техніки, а також фрізерів, водоохолоджувачів і т.п., де в основному використовуються герметичні та напівгерметичні компресори, можливість уникнути заміни мастила особливо актуальна. На жаль, чистих озонобезпечних речовин, аналогічних по своїх властивостях R134a у природі не існує, тому пошук можливих альтернатив здійснюється в класі сумішей, де базисним компонентом служить R22. Конкуруючі речовини, що використовують багатокомпонентні суміші, фактично представлені на ринку для виробників побутової холодильної техніки такими перехідними холодоагентами, як R401A (MP39) - суміш R22/R152a/R124, R406A (GHG12) - суміш R22/R600a/R142b, R409A (FX56) - суміш R22/R124/R142b і 310M - суміш R22/R21/R142b. Перераховані суміші містять компоненти, що включають атоми хлору, і в довгостроковій перспективі (до 2030 року) повинні бути також виведені з обороту.

Найбільш загальний підхід до оцінки екологічних впливів забезпечує аналіз життєвого циклу холодильної системи (Life Cycle Analysis - LCA). Такий аналіз базується на рівняннях балансу маси та енергії в системі, що розглядається не тільки з погляду фізико-хімічних процесів, але й

включає економічні та екологічні аспекти. LCA розширює традиційний системний аналіз процесів, не обмежуючись тільки рамками балансу потоків маси й енергії.

У дисертації розглянута спроба більш коректного одночасного обліку енергетичних, економічних і екологічних показників у рамках багатокритеріального аналізу життєвого циклу холодильної системи. Оцінка життєвого циклу холодильної системи переслідувала дві мети

Перша - це оцінка екологічних характеристик робочих тіл холодильної машини для прийняття рішень про вибір найбільш екологічно безпечного холодоагенту серед існуючих альтернатив.

Друга мета полягала в розробці таких конструктивних елементів холодильної системи, що зменшать її негативний вплив на навколишнє середовище за рахунок зменшення термодинамічних збитків.

Холодинна промисловість усе частіше застосовує вуглеводневі холодоагенти як робочі тіла. У зв'язку з цим у ряді країн були переглянуті деякі стандарти безпеки, зокрема, електричні, для того, щоб дати можливість використовувати вуглеводні та інші пожежонебезпечні холодоагенти в таких пристроях, як домашні холодильники, повітряні кондиціонери і навіть МХМ супермаркетів.

Проведено аналіз стандартів безпеки для пожежонебезпечних холодоагентів, що дає уявлення про два фундаментальні аспекти проблеми, які визначають чи є даний холодоагент пожежонебезпечним і при яких умовах; при як умовах даний пожежонебезпечний холодоагент може бути використаний без ризику.

Недостатність експериментальних даних по властивостях систем "мастило - багатокомпонентний холодоагент" робить у даний час практично нереалізованим варіант одночасного створення нового холодоагенту і мастила. Тому в роботі підбір мастил не включали в основні кількісні критерії концептуального вибору альтернативних багатокомпонентних холодоагентів, а використовували в якості додаткової якісної оцінки впливу мастила на енергетичні та експлуатаційні характеристики холодильної системи.

Енергетичний аудит холодильних систем є першим кроком на шляху обґрунтованого вибору пропонованих холодоагентів. Його надійність головним чином визначається точністю експериментальних даних і теоретичних моделей термодинамічних властивостей і фазової поведінки робочих тіл. Існує великий набір комбінацій природних і штучних альтернативних холодоагентів, що можуть бути використані в холодильній техніці і кондиціонуванні повітря. Однак практично у всіх випадках застосування чистих компонентів виникає відома дилема: якщо робоче тіло володіє високою енергетичною ефективністю, то воно відноситься до класу пожежонебезпечних речовин (наприклад, вуглеводні) і навпаки. Розширення класу холодоагентів може бути досягнуте за рахунок сумішей, причому кращими є азеотропні суміші, що поведуться подібно чистим речовинам. Крім того, необхідно забезпечити відповідне фазове поводження

суміші холодоагенту з мастилом, щоб забезпечити ефективне повернення мастила і уникнути погіршення процесів теплопередачі. Реалізація таких суперечливих вимог повинна спиратися на теоретично і експериментально обґрунтований фундамент сучасних методів прогнозування термодинамічних властивостей і фазових рівноваг у розчинах.

У своїх дослідженнях автор спирався на роботи В.Ф.Чайковського, В.С. Мартиновського, Л.З.Мельпера, А.П. Кузнецова, В.М. Бродяньського, Г.К. Лавренченка, М.Д. Захарова, В.О. Мазура, В.З.Геллера, І.М. Калніня, Bivens D., Groll E.A., Kruze H., Lorentzen G., McLinden M.J., Watanabe K, Yokozeki A. та інших авторів, у яких розглянуті питання термодинамічного аналізу циклів, удосконалювання холодильних машин, раціонального застосування багатокомпонентних холодоагентів.

Другий розділ дисертації присвячений опису розроблених автором експериментальних установок для дослідження фазових рівноваг рідина-рідина і рідина-пара. Викладено методики проведення експериментів, виконаний аналіз похибок отриманих експериментальних даних, приведено результати теоретичних і експериментальних досліджень.

Різноманіття фазової поведінки розчинів найбільш суворо може прогнозуватися за допомогою топологічних методів, що успішно розвиваються, починаючи з піонерських робіт Ван-дер-Ваальса. В основі цього напрямку лежить ідея про ключову роль критичних параметрів компонентів, що визначають топологію фазових діаграм бінарної суміші. Найбільш чітка класифікація типів фазової поведінки в бінарних розчинах дана в класичній роботі Ван Кониненбурга - Скотта, де уперше введене поняття глобальної фазової діаграми (Master Diagram). Відображення глобальної термодинамічної поверхні на простір критичних сталих компонентів забезпечує повну систему критеріїв фазового поведіння бінарної суміші. Якісно глобальні фазові діаграми для різних моделей рівнянь стану виявляються ідентичними і дозволяють одержати аналітичні вирази для прогнозу явищ азеотропії через критичні константи чистих компонентів і параметр бінарної взаємодії.

Спроби створити настільки ж струнку систему класифікації тернарних систем виявилися менш успішними і надзвичайно громіздкими. Найбільш повний аналіз, виконаний у роботі Matsuama, Nishimura нараховує 113 топологічно різних типів фазових діаграм, що на порядок більше в порівнянні з бінарними розчинами.

Для класу речовин, розглянутих у роботі, проаналізовані різні критерії появи азеотропії, запропоновані різними авторами на основі різних теоретичних і напівемпіричних уявлень (глобальні фазові діаграми, аналіз фугітивностей компонентів, кореляційні співвідношення та ін.). Попередня теоретична оцінка різних альтернативних методів дозволила різко зменшити перебір компонентів і вибрати перспективні холодоагенти, у яких найбільш ймовірно поява азеотропії. У таблиці 1 на основі різних критеріїв теоретичного прогнозування азеотропії відібрані суміші

холодоагентів, що досліджені в роботі, і у яких слід очікувати експериментального підтвердження явищ азеотропії.

Однак прогнозування фазової поведінки розчинів на основі різних термодинамічних критеріїв носить загальний характер і не дозволяє відповісти на запитання про конкретний склад азеотропної суміші. Крім того, визначення параметрів перехресної взаємодії теоретичними методами пов'язано з великою невизначеністю і вимагає залучення обмежених даних про фазові рівноваги в суміші. Тому в роботі для обраного класу холодоагентів були проведені експериментальні дослідження фазових рівноваг рідина - пара і рідина - рідина, щоб відновити параметри перехресної взаємодії найбільш адекватні для обчислення енергетичних характеристик циклів і визначення азеотропних складів суміші.

Таблиця 1

Холодоагенти	NH ₃	CO ₂	R290	R600a	R32	R125	R134a	R152a	R218	RC318
NH ₃			✓	✓		✓	✓		✓	✓
CO ₂										
R290	✓				✓		✓		✓	
R600a	✓				✓		✓	✓	✓	✓
R32			✓			✓				
R125	✓				✓					
R134a	✓		✓	✓						
R152a				✓						
R218	✓		✓	✓						
RC318	✓			✓						

При виборі методики і створенні експериментальної установки виходили з наступних вимог: добра ізотермічність осередку, можливість роботи в досить широкому діапазоні параметрів стану, добрі динамічні якості термостату, стабільна робота установки і приладів в умовах тривалого за часом експерименту, мінімальні габарити вимірювального осередку, можливість візуальних спостережень, мінімальний вплив факторів, що спотворюють точність отримання експериментальних даних (градієнти температури, домішки, невизначеність складу і т.д.). Створена експериментальна установка об'єднала два спеціальних методи досліджень:

- статичний метод "точки кипіння-точки роси" при дослідженні паро-рідинної рівноваги;
- синтетичний метод "візуальних спостережень" при дослідженні фазової рівноваги типу рідина-рідина.

Ці методи є одними з найбільш точних, надійних і простих у своєму класі досліджень і дали можливість проводити вивчення фазових рівноваг суміші в установці з невеликим робочим

обсягом. Створена експериментальна установка для дослідження фазових рівноваг дозволяє одержувати Р-Т-х- співвідношення сумішей речовин у широкому інтервалі параметрів стану: по температурі - 77...330 К, по тиску - 0...4 МПа. Вимірювальний осередок являє собою товстостінну ампулу місткістю 5 см³, попередньо випробовану на тиск 10 МПа. Коваровим з'єднанням осередок з'єднаний із заправною магістраллю. Ампула є знімною і через запірний вентиль може з'єднуватися із заправною магістраллю, що включає вакуумний насос і мірний балон з досліджуваною речовиною. Перемішування суміші виконується нікелевою спіраллю, розташованою в ампулі. Вертикальний зворотно-поступальний рух спіралі забезпечується відповідним переміщенням за допомогою електромотору і постійного магніту, що знаходиться зовні поруч з ампулою. Похибка виміру тиску оцінюється з точністю ± 0.2 кПа. Температуру розчину вимірювали платиновим термометром опорів з похибкою ± 0.02 К. Для досліджень використовувалися зразки речовин з чистотою 99.98% для хладонів і 99.56% для NH₃. Тиск пари вимірювали по ізоскладах, термостатуючи досліджувану систему в інтервалі температур 203...313 К. Склади і нормальні температури кипіння азеотропних сумішей досліджених холодильних агентів наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Суміші	Концентрація компонентів, моль/моль	Нормальна температура кипіння, °C ($P_b=0,1013$ МПа)
RC318/R600a	0.40/0.60	-20.4
R134a/R600a (RC)	0.70/0.30	-33.35
R152a/R600a (RD)	0.70/0.30	-29.30
R218/R600a	0.75/0.25	-39.30
R290/152a	0.77/0.23	-42.50
R290/R134a	0.62/0.38	-44.70
R290/R218 (RE)	0.60/0.40	-49.40
R32/R600a	0.90/0.10	-52.90
R32/R290	0.70/0.30	-59.00
R32/R218	0.75/0.25	-57.10
R717/R290	0.70/0.30	-51.85
R717/R218	0.80/0.20	-49.06
R717/R152a	0.67/0.33	-42.61
R717/RC318	0.62/0.38	-43.13
R717/R600	0.80/0.20	-40.59
R717/R600a	0.75/0.25	-42.00

Фазова поведінка сумішей природних і альтернативних холодоагентів ілюструється на основі отриманих експериментальних даних (див. рисунки 1 - 4).

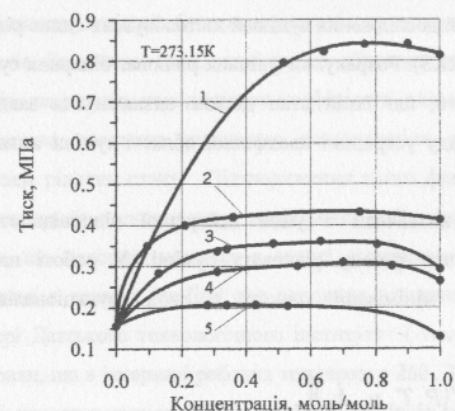


Рис. 1. Фазові діаграми сумішей на основі ізобутану: 1 – R600a/R32; 2 – R600a/R218; 3 – R600a/R134a; 4 – R600a/R152a; 5 – R600a/RC318

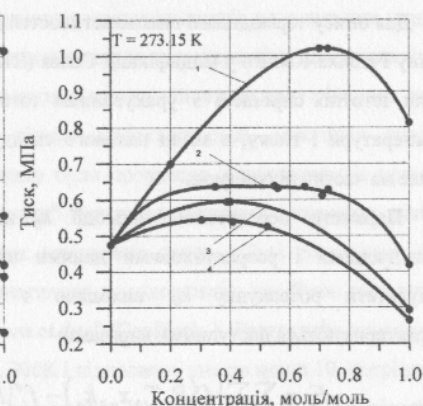


Рис. 2. Фазові діаграми сумішей на основі пропану: 1 – R290/R32; 2 – R290/R218; 3 – R290/R134a; 4 – R290/R152a

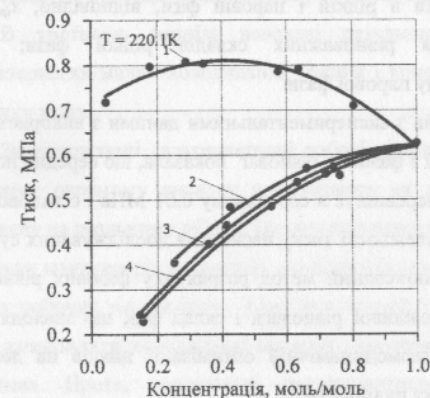


Рис. 3. Фазові діаграми сумішей на основі діоксиду вуглецю: 1 – R744/R170; 2 – R744/R290; 3 – R744/R600a; 4 – R744/R600

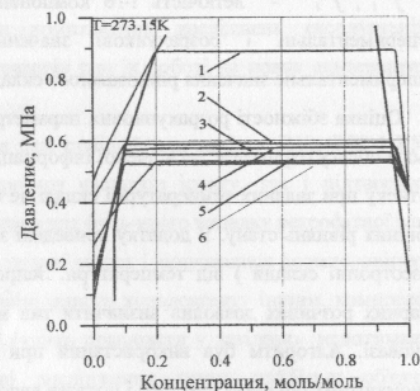


Рис. 4. Фазові діаграми сумішей на основі аміаку: 1 – R717/R290; 2 – R717/R218; 3 – R717/R600a; 4 – R717/RC318; 5 – R717/R152a; 6 – R717/R600

Розроблено методику і надійний алгоритм розрахунку фазових рівноваг бінарних сумішей типу рідина-пара, рідина-рідина і рідина-рідина-пара при різних концентраціях, у тому числі і для бінарних азеотропних сумішей.

Розглянутий підхід не пред'являє ніяких спеціальних вимог до виду рівнянь стану. Необхідно тільки, щоб обране рівняння стану було єдиним, тобто описувало рідину і пару, і мало задовільну точність опису термічних і калоричних властивостей сумішей.

Для опису термодинамічних властивостей досліджених сумішей застосовували єдине рівняння стану Редліха-Квонга у модифікації Соава (RKS). Розрахунки фазових рівноваг бінарних сумішей були істотно спрощені з урахуванням того, що їхній стан цілком визначається завданням температури і тиску, а зміни валового складу усередині двохфазної області суміші впливають лише на частку рідкої фази.

Параметр перехресної взаємодії k_{ij} визначали з умов найкращої відповідності між досвідченими і розрахунковими даними про фазову рівновагу суміші. У роботі наведені результати розрахунку k_{ij} , виходячи з мінімізації одного з двох функціоналів, що характеризуються наступними виразами:

$$F = \sum_{n=1}^2 \sum_{i=1}^M \left[f_i(P_i, T_i, x_{in}, k_{ij}) - f_i''(P_i, T_i, y_{in}, k_{ij}) \right]^2, \quad (1)$$

$$F = \sum_{i=1}^M \left[x_{ip} - x_{in}(P_i, T_i, k_{ij}) \right]^2, \quad (2)$$

де f_i', f_i'' - летучість i -го компонента в рідкій і паровій фазі, відповідно; x_{ip}, x_{in} - експериментальні і розрахункові значення рівноважних складів рідкої фази; y_{in} - експериментальне значення рівноважного складу парової фази.

Оцінка збіжності розрахункових параметрів з експериментальними даними з використанням всього обсягу отриманої досвідченої інформації з фазових рівноваг показала, що середня похибка по тиску при заданих температурі і складі не перевищує в середньому 0.01 МПа і є типовою для кубічних рівнянь стану. У додатку приведені залежності тиску насичення досліджуваних сумішей (азеотропні склади) від температури. Запропонований метод розрахунку фазових рівноваг у бінарних розчинах дозволив визначити тип можливої рівноваги і склад фаз, що знаходяться в рівновазі. Алгоритм був використаний при термодинамічній оптимізації циклів на десятках різноманітних бінарних сумішей і показав високу надійність.

У ході роботи були досліджені суміші R134a/RR600a, R152a/R600a і R218/R290, що представляють найбільший інтерес як перспективні холодоагенти з точки зору термодинамічних і екологічних показників. Для цих сумішей використання кубічних рівнянь стану, що глобально описують термодинамічну поверхню, але не володіють досить високим ступенем адекватності при кількісному відтворенні експериментальних даних, приводить до неточності моделювання експлуатаційних характеристик холодильних машин. Тому при моделюванні показників роботи холодильної машини, що працює на суміші холодоагентів, із практичної точки зору перевагу

відавали створеним емпіричним поліноміальним рівнянням стану, що добре зарекомендували себе при описі термодинамічних властивостей, хоча і не пристосовані для опису фазових рівноваг.

Розроблені програмні модулі, що дозволяють розрахувати термодинамічні властивості досліджених сумішей, були використані для уточненого розрахунку циклів холодильних машин і апаратів. Як показав подальший аналіз, обчислення інтегральних характеристик термодинамічних циклів, наприклад, холодильного коефіцієнта виявляється малочутливим до виду рівняння стану, що можна пояснити можливою компенсацією різних неадекватностей, властивих простим моделям рівнянь стану. Підтвердження цього факту було проведено зіставленням із прямими розрахунками холодильного коефіцієнта з "точними" багатоконстантними моделями рівнянь стану, що використовуються в якості стандартних довідкових даних. Такі розрахунки були виконані в режимі "on-line" для основних альтернативних холодоагентів, що були доступні на сервері Датського технологічного інституту (www.et.dtu.dk/CoolPack). Результати розрахунків показали, що в інтервалі робочих температур 260...300K і відношенні тисків менш 10, погрішність опису холодильного коефіцієнту модифікованими рівняннями стану Редліха-Квонга в порівнянні з довідковими даними не перевищувала 5%. Ця обставина підтверджує правильність вибору простих моделей рівнянь стану для надійного опису інтегральних показників роботи холодильної установки, не претендуючи на високу точність відтворення термодинамічних характеристик.

В третьому розділі наведені результати комплексних досліджень експлуатаційних характеристик малих холодильних машин і компресорів при їх роботі на нових альтернативних робочих тілах.

Запропоновані альтернативні робочі тіла на базі сумішей для заміни R12, R22 і R502 у кожному окремому випадку припускають як прогноз наслідків іспиту, так і підтвердження прогнозу на реальному об'єкті. Ця ситуація характерна для будь-якого випадку ретрофітної заміни, оскільки компресорів і агрегатів, які б спеціально розроблялися і випускалися промисловістю для нових робочих тіл, не існує. Тому при прямій заміні одного холодоагенту іншим, компресор та інші компоненти холодильної системи неминуче будуть працювати у завідомо неоптимальних режимах. Проте, порівняльні експериментальні дослідження дають найбільш об'єктивну інформацію, що дозволяє зробити висновок про перспективність тих чи інших робочих тіл, запропонованих як альтернативу R12, R22 і R502.

Випробування холодильних машин дозволили одержати найбільше повну інформацію про об'ємні й енергетичні показники, величину і закономірності зміни загального температурного рівня герметичного компресора й агрегату. Для проведення серії іспитів герметичних компресорів був створений експериментальний стенд, що задовольняє вимогам стандартів (ДСТ 17008-85).

Для обліку усіх втрат енергії в компресорі використана методика, що дозволяє оцінити енергетичну досконалість герметичного компресора при проведенні експериментальних

досліджень. Методика містить показники, що оцінюють окремі види енергетичних втрат герметичного компресора, використовуючи електричний ККД компресора:

$$\eta_{el} = \frac{\varepsilon_{el}}{\varepsilon_T} = \frac{N_T}{N_{el}} = \eta_i \eta_{mec} \eta_{mot}, \quad (3)$$

де ε_{el} , ε_T ; N_{el} , N_T - холодильні коефіцієнти, відповідно, електричний і теоретичний, а також відповідні їм потужності; η_i - індикаторний ККД, що характеризує відмінність індикаторної діаграми реального компресора від теоретичної; η_{mec} - механічний ККД, що враховує втрати від тертя і потужності насоса мастила компресора; η_{mot} - КПД електромотора компресора.

Випробування холодильного агрегату проводили на спроектованому експериментальному стенді (ДСТ 22502-89), що був оснащений штатним конденсатором холодильника КЩД-270/80, компресором ХКВ-6 і регенеративним теплообмінником. Холодильна і морозильна камери імітувалися калориметрами з вторинним агентом (R12).

У дисертації досліджені теплоенергетичні характеристики елементів компресорних агрегатів побутових холодильників на R134a. Проблема переходу з озоноруйнуючого холодоагенту R12 на озоннебезпечний холодоагент R134a особливо гостро стоїть для побутових компресорних холодильників. Обумовлено це тим, що всі компресорні холодильники випускалися дотепер на холодоагенті R12. Об'єктами досліджень служили компресорні агрегати із серійними швидкообертливими герметичними поршневыми компресорами ХКВ-5, ХКВ-6 і ХКВ-8. В агрегатах використовували серійні конденсатори, випарники і дросельні пристрої (капілярні трубки), що є елементами побутових холодильників. Випарник був замінений калориметром із вторинним холодоагентом. Температура кипіння змінювалася за рахунок маси холодоагенту, що заправляється в агрегат.

Дослідження компресорів у складі агрегату проводили в широкому діапазоні зміни режимних параметрів: температур кипіння від 263 К до 243 К при температурах навколишнього середовища 293, 298 і 305 К. У процесі калориметричних досліджень роботи агрегатів на R134a отримані оцінки рівня холодопродуктивності і енергетичної ефективності, забезпечувані тією чи іншою прохідністю капілярної трубки в залежності від тиску на її вході, а також температури кипіння, відповідно.

Аналіз залежності холодильного коефіцієнта агрегату від параметрів капілярної трубки дозволив зробити висновок про те, що в досліджуваному діапазоні режимних параметрів слабо впливають конструктивні особливості капілярних трубок.

Проведено порівняльні випробування холодильних агрегатів на R134a і R12. Аналіз залежності значень холодопродуктивності від температури кипіння показує, що у всьому діапазоні досліджуваних температур кипіння холодопродуктивність агрегату на R134a нижче. Причому, якщо при $T_0 = 258$ К різниця холодопродуктивностей складає близько 15 Вт, то зі зниженням

температури кипіння холодоагентів вона збільшується і на рівні температури кипіння $T_0 = 245$ К досягає 20 Вт. Аналогічний характер носить і залежність холодильного коефіцієнта агрегату від температури кипіння.

Проведено порівняльне калориметрування компресора ХКВ-6-1ЛБ при роботі його на хладачах R12, R134a і азеотропних сумішах R134a/R12 (0.46/0.54) і R152a/R12 (0.26/0.74) (склад зазначений у масових частках кг/кг). При роботі компресора на R12 використовували мастила ХФ 12-18, а при роботі на R134a - ХФС-502. Випробування проведені при таких параметрах: температурі кипіння $T_0 = 243$ К, температурі конденсації $T_k = 303$ К, температурі всмоктування $T_{вс} = 293$ К. Аналіз показує, що заміна R12 на R134a при умовах експерименту приводить до зниження холодопродуктивності і електричного холодильного коефіцієнту. Використання суміші R134a/R12 (0.46/0.54) дозволяє збільшити холодопродуктивність компресора на 35 %, у порівнянні з R12, при незначному зростанні холодильного коефіцієнта (приблизно на 5%). Порівняльні дослідження були продовжені на побутових холодильниках, що випускаються Донецьким заводом: однокамерному "Норд-316" і двокамерному "Норд-214". Дослідження проводили відповідно до ДСТ 26678-85. Аналіз експериментів показав, що однокамерний холодильник має кращі показники при роботі на суміші R134a/R12: енергоспоживання менше на 4 і 16 %, чим для чистих R12 і R134a, відповідно. При роботі двокамерного холодильника на суміші R134a/R12 і на R12 спостерігається практично однакове добове енергоспоживання, що виявляється на 6.5 % менше в порівнянні з тим, коли холодильник працює на чистому R134a.

Таким чином, запропонована азеотропна суміш хладонів R134a/R12 (0.46/0.54) може бути рекомендована для тимчасового застосування в побутових компресійних холодильниках параметричного ряду, тому що відпадає необхідність у заміні застосовуваних зараз мінеральних компресорних мастил і знижується вплив агрегатів побутової холодильної техніки на руйнування озонного шару.

У роботі проведені іспити герметичних компресорів для побутових холодильників на різних робочих тілах - альтернативних R12. Об'єктом дослідження обраний герметичний компресор серії GL60AA "Zanussi" спеціально розроблений для застосування в побутових холодильних приладах, що використовують як робоче тіло R134a. Дослідження компресора GL60AA на сумішах R134a/R600a і R152a/R600a проводилися з використанням різних олій для вивчення впливу складу суміші і роду олії на енергетичні характеристики компресора. Використовувалися мастила - мінеральне ХФ12-18(М) і синтетичне - естерове, запропоноване для дослідження фірмою "Zanussi".

Зміна концентрації ізобутану(R600a) у суміші проводили в двох напрямках: перше - при використанні мінерального мастила збільшення концентрації R600a поліпшує розчинність суміші з мастилом (проблема заміни холодоагенту після ремонту чи компресора агрегату), друге -

при використанні синтетичного мастила, тому що збільшення змісту R134a в суміші зменшує пожежонебезпеку суміші.

Дослідження показали (рис. 5), що добавки R600a до R134a приводять до збільшення холодопродуктивності і холодильного коефіцієнта. Кращі характеристики компресора, як і очікували, були отримані при роботі на азеотропній концентрації холодоагенту RC.

Найбільший інтерес представляє порівняння характеристик компресора на суміші RC з мінеральною і синтетичною мастилами. Так, наприклад, холодопродуктивність компресора на мінеральній олії в порівнянні із синтетичним при збільшенні температури кипіння росте незначно. Однак, споживана потужність компресора вище при використанні синтетичного мастила у всій області температур кипіння на 3...5 Вт

Незначне зростання споживаної потужності, очевидно, можна пояснити більш високими значеннями в'язкості системи холодоагент – синтетичне мастило. Ріст холодопродуктивності при використанні мінерального мастила можна пояснити меншою розчинністю в сумішах RC і RD і тому меншим впливом на термодинамічні властивості системи холодоагент – синтетичне мастило.

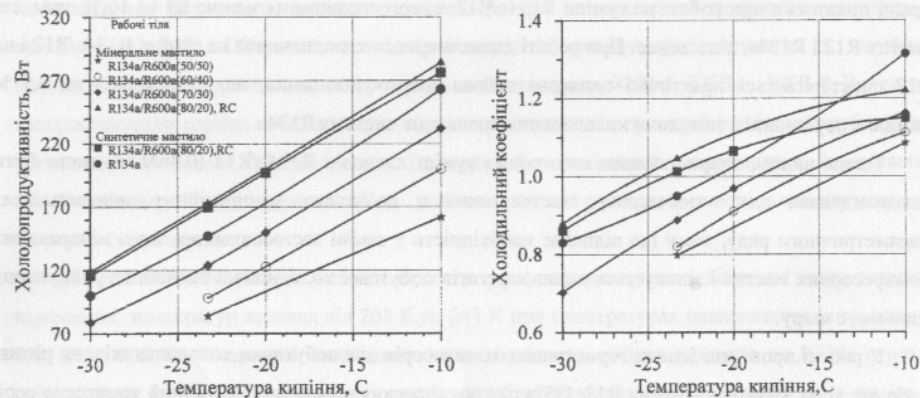


Рис. 5. Холодопродуктивність (а) і холодильний коефіцієнт (б) компресора GL60AA на суміші R134/R600a для різних концентрацій і R134a при $T_{\text{кон}} = 55^\circ\text{C}$, $T_{\text{вс}} = 32^\circ\text{C}$

Аналогічний характер залежностей спостерігається при випробуваннях суміші R152a/R600a з різним змістом R600a. Таким чином, можна зробити висновок, що застосування сумішей R134a/R600a і R152a/R600a найбільш переважно в системах з герметичним компресором, заповненим мінеральним мастилом. Кращі характеристики спостерігаються при складах сумішей, що відповідають азеотропним концентраціям - RC і RD

Необхідно відзначити, що компресор, який працює на суміші RC, має на 15% велику холодопродуктивність у порівнянні із сумішшю RD і хладагентами R12 і R134a, що мають близькі значення холодопродуктивності. У той же час холодильний коефіцієнт компресора на суміші RD має максимальні значення і на 2...6% вище чим на RC, особливо в області температур кипіння - 20...- 10 °C.

Проведені дослідження показують, що суміші RC і RD є хорошою альтернативою R12.

Проведено порівняльні дослідження енергетичних характеристик компресора GL60AA на чистому ізобутані і азеотропних сумішах, де ізобутан використовується як добавка - RC, RD і RC318/R600a(70/30). Аналіз залежності значень холодопродуктивності показує, що холодопродуктивність у всьому діапазоні досліджуваних температур для R600a - найменша.

Холодильний коефіцієнт компресора на суміші RC318/R600a має найменше значення і тільки в області температур кипіння нижче - 20°C трохи вище, ніж на R600a. Найбільший інтерес уявляє зниження термонапруженості компресора (температури нагнітання $T_{\text{км2}}$, обмоток електродвигуна $T_{\text{об}}$ і мастила в кожусі компресора $T_{\text{м}}$) при роботі на суміші RC318/R600a. Отже, суміш RC318/R600a (70/30) поряд з вивченими робочими тілами RC і RD становить інтерес як холодоагент для використання в герметичних холодильних агрегатах побутової техніки.

Аналіз фазових діаграм і попередні розрахунки дозволили виділити суміші, що становлять інтерес як альтернативні холодоагенти низькотемпературних машин - для заміни R22 і R502. Такими робочими тілами є пропан (R290), бінарні азеотропні суміші R290/R218 (RE), R290/R134a, R290/R152a, R218/R600a, а також потрійні азеотропні суміші R218/R152a/R600a (RA), R218/R134a/R600a (RB) і R218/R134a/R290 (RB1). Особливу групу представляли низькотемпературні суміші на основі R32 (R32/R600a, R32/R290 і R32/R218).

Як об'єкт дослідження був обраний герметичний компресор S22FN, застосовуваний у торговому холодильному устаткуванні. Як показали результати експериментів, найбільший холодильний коефіцієнт у діапазоні температур -35...-20 °C досягається для робочого тіла RA; при температурі випару вище -20 °C найбільшу ефективність має холодоагент R290 (рис. 6,б). Очевидно, що це відбувається насамперед через низькі значення споживаної потужності, для зазначених холодоагентів у порівнянні, наприклад, с R502, тому що по холодопродуктивності вони уступають останньому (рис.6,а).

Крім того, компресор при роботі на R290 має в діапазоні температур випару від - 20 °C до -10 °C, найбільше значення коефіцієнта подачі, що також добре позначається на ефективності компресора. З приведених залежностей випливає, що досліджувані холодоагенти в цілому мають більш високу ефективність у порівнянні з R22 у всьому діапазоні температур випару. Необхідно окремо відзначити холодоагент RE (R290/R218). Незважаючи на низькі значення коефіцієнта подачі компресора, що працює на даному холодоагенті і досить високу споживану потужність (що

обмежило діапазон температур кипіння при випробуваннях компресора через його переважання), R290/R218 по величині холодильного коефіцієнту можна віднести до кращих робочих тіл.

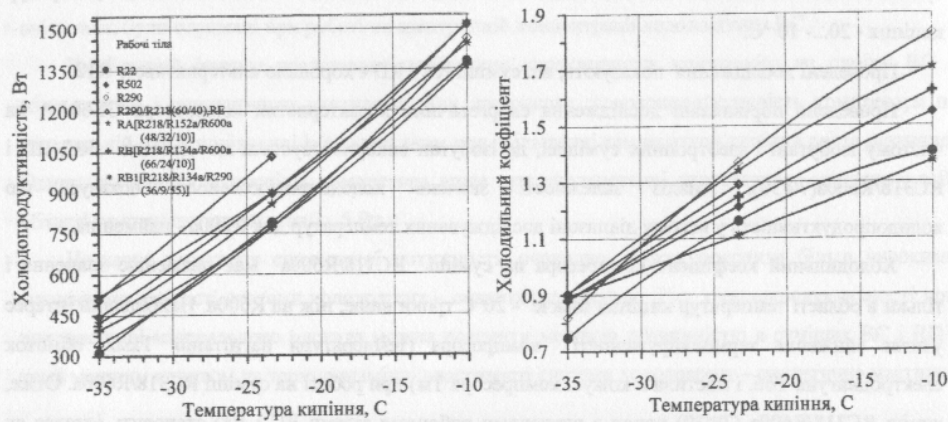


Рис. 6. Холодопродуктивність (а) і холодильний коефіцієнт (б) компресора S22FN, що працює на різних робочих тілах при $T_{\text{кон}} = 45^\circ\text{C}$, $T_{\text{вс}} = 32^\circ\text{C}$

Суміші на основі R32 (R32/R600a, R32/R290 і R32/R218) характеризуються двома особливостями, що визначають поведінку робочого тіла в циклі холодильної машини.

По-перше суміші є азеотропними. По-друге суміші розшаровуються з утворенням трьох фаз (рідина-рідина-пара). Найбільший інтерес уявляє суміш R32/R600a, що має тиск на рівні тиску R32 і зону обмеженої розчинності рідина-рідина-пара при можливих (помірковано низьких) температурах кипіння. Було виявлено, що компресор в області обмеженої розчинності має холодо-продуктивність близьку до RE, однак холодильний коефіцієнт нижче в порівнянні з RE і R502 на 25 %.

Результати іспитів показали, що холодопродуктивність компресора, що використовує суміші на основі природного холодоагенту R290 (R290/R134a, R290/R152a і R218/R600a), має близькі значення до аналогічних показників для R22 і R502. Холодильний коефіцієнт, у залежності від умов експлуатації, для сумішей в області температур кипіння $-20... -10^\circ\text{C}$ вище, ніж для R22 і близький до величин характерних для R502

Сприятливе сполучення доброї охолоджувальної здатності, що характеризується високою масовою витратою і низьким показником політропи стиску, при приблизно однакових ступенях стиску сумішей R218/R600a і R290/R152a, дозволяє одержати кращі, у розглянутому класі холодильних агентів, температурні характеристики компресора і більш прийнятні умови роботи

машини. Результати проведених досліджень лягли в основу узагальненої моделі об'ємних і енергетичних характеристик герметичних компресорів. Необхідно відзначити, що залежності коефіцієнта подачі і електричного ККД компресора від ступеня стиску при використанні іншої моделі компресора будуть відрізнятися (для малих герметичних компресорів розбіжність складає близько 4...8%), тому необхідно мати залежності $\lambda = f(\pi)$ і $\eta_{sl} = f(\pi)$ для кожного типу компресорів. Використання математичної моделі компресорів у вигляді залежностей $\lambda = f(\pi)$ і $\eta_{sl} = f(\pi)$ коректно тільки для попередньої оцінки характеристик роботи компресорів і холодильних машин на різних робочих тілах.

Важливими показниками, поряд з об'ємними і енергетичними, компресорів побутових холодильників є їхні шумові характеристики. Усе зростаючі вимоги до зниження рівня звукової потужності, а також необхідність переведення холодильної техніки на роботу з екологічно чистими робочими тілами викликають необхідність постійної модернізації існуючих машин. Цим викликана необхідність проведення серйозних акустичних випробувань холодильних компресорів з метою визначення основних джерел шуму, шляхів передачі звукової потужності і вироблення рекомендацій з поліпшення ергономічних показників. Об'єктом іспитів був обраний герметичний компресор побутового холодильника ХКВ-6,65 виробництва Донецького заводу холодильників "NORD". Методика вимірів відповідала вимогам ДСТ 12.1.026-80 і ДСТ 23941-79.

Дослідження акустичних характеристик компресора проводили з застосуванням як робочих тіл холодильних агентів R12, R134a, так і азеотропних сумішей R12/R134a(40/60), R134a/R600a(80/20).

У результаті проведених акустичних досліджень було становлено: загальний рівень шуму містить як газодинамічні, так і механічні складові; одним з виявлених джерел підвищеного шуму є сполучення поршень - циліндр. Для зниження цього шуму варто проводити дослідження з різними варіантами геометрії (овальність, конусність і т.д.), чистоти поверхонь, а також селективної зборки тертьової пари (поршень-циліндр). Наявність високого газодинамічного шуму викликано недосконалістю конструкцій глушників і для кожного робочого тіла необхідно підбирати свою конструкцію глушника.

Для визначення енергетичної ефективності використання нових холодоагентів були проведені порівняльні експериментальні дослідження різних побутових холодильників і морозильників. Експериментальні дослідження проводилися на базі серійних моделей різних вітчизняних і закордонних виробників побутової техніки відповідно до вимог ДСТ 16317-87

Дослідження проводилися в ОДАХ, АТ "НОРД" і НДІ "ВЕСТА". Особливістю експериментальних досліджень було визначення їх вихідних функціональних енергетичних характеристик при роботі на холодоагенті R12, а потім їхні наступні випробування на різних альтернативних робочих тілах.

Програма досліджень передбачала також проведення робіт із визначенням оптимальної дози заправлення при використанні того чи іншого робочого тіла.

Дослідження показали, що холодильники і морозильники при роботі на робочих тілах RC і RD споживають електроенергії на 5...15% менше, ніж на R12. Доза заправлення знижується на 10...25%.

В четвертому розділі розглядаються питання застосування в холодильних машинах природних холодоагентів. При аналізі позитивних якостей і недоліків штучних холодоагентів необхідне розуміння альтернативних можливостей природних холодоагентів (вуглеводнів, аміаку, води, інертних газів). У даному розділі проводиться докладний аналіз ефективності роботи малих холодильних машин, що використовують вуглеводні і діоксид вуглецю, як найбільш перспективні робочі речовини за екологічними показниками. Значна увага приділена гетероазеотропним робочим тілам на основі аміаку - маловивченому класу холодоагентів, для якого практично відсутня експериментальна інформація, як про термодинамічну поведінку, так і експлуатаційних характеристиках холодильних машин, що використовують такі суміші. Як одна з можливих спроб зниження пожежонебезпеки вуглеводнів розглянута принципова можливість застосування сумішей вуглеводнів з діоксидом вуглецю. Проведено цілий цикл досліджень, що дозволив виділити як критерії порівняння і основу багатокритеріального аналізу такі фізико-хімічні і експлуатаційні характеристики: нормальна температура кипіння - T_b ; коефіцієнт подачі - λ , холодопродуктивність - Q_0 , холодильний коефіцієнт - ε ; електричний ККД компресора - η_{el} .

Для умов експлуатації малих холодильних машин були задані такі параметри: температура кипіння у випарнику - -23.3°C для ретрофіту R12 і -35°C для ретрофіту R22; температури конденсації - 55°C і 45°C , відповідно. Основні характеристики роботи холодильних машин узяті з різних літературних джерел, обчислені з використанням комп'ютерних програм REFPROP, SOLCAN і COOLPACK, а також використовують оригінальні експериментальні дані, отримані в дисертації.

Для вибору компромісного робочого тіла серед можливих альтернатив застосовували багатокритеріальний порівняльний алгоритм аналізу, що полягає в такому:

- задається набір "ідеальних" властивостей і характеристик, якими повинний володіти холодоагент для точно встановлених умов і режимів роботи холодильної машини. Ці значення заздалегідь задаються проектувальниками, виходячи з конкретної постановки задачі. Так, наприклад, K^0_1 - значення максимальне досяжного холодильного коефіцієнта, у нашому випадку, холодильний коефіцієнт циклу Карно; K^0_2 - необхідна нормальна точка кипіння холодоагенту; K^0_3 - коефіцієнт подачі компресора, що дорівнює одиниці; K^0_4 - холодопродуктивність холодильної машини при коефіцієнті подачі, що дорівнює одиниці для R12 і R22 - при аналізі відповідних альтернативних робочих тіл і т.д;

- вибирається критерій якості холодоагенту, що визначається як ступінь близькості "ідеальних" і реальних характеристик. Для зіставлення безлічі критеріїв близькості, що мають різні розмірності, критерій якості зручно записати у відносних величинах:

$$D_i = 1 - K_i / K^0_i, \quad i = 1, 2, 3 \dots N; \quad (4)$$

- для зіставлення всього спектра показників узагальнений критерій записується у вигляді зваженого середнього:

$$D = \sum_{i=1}^N w_i |D_i|, \quad i = 1, 2, 3 \dots N. \quad (5)$$

Мінімальне значення величини D відповідає кращому холодоагенту серед аналізованого класу речовин. Для аналізу робочих тіл по заміні R12 розглядали чисті речовини - R152a і R134a, а також суміші - R401A, R409A, R290/R600a(50/50), R134a/R600a(80/20), R152a/R600a(75/25), R134a/R152a, R22/R142b, C10M1. На рис. 7 приведений порівняльний аналіз робочих тіл за узагальненим критерієм (5). Найкращими показниками володіє суміш природних вуглеводнів R290/R600a(50/50), що виробниками холодної устаткування відкидається за фактором пожежонебезпеки. Система R134a/R600a(80/20) виявляє практично однакові показники з пропан-ізобутановою сумішшю, але є більш прийнятною для експлуатації, поліпшуючи показники роботи холодильної машини, що використовує найбільш широко застосовуваний холодоагент R134a.

Цей результат підтверджує наукове положення дисертації про перспективність застосування добавок природних холодоагентів до вже застосовуваних штучних холодоагентів для поліпшення їхніх характеристик (т.зв. бріндинг).

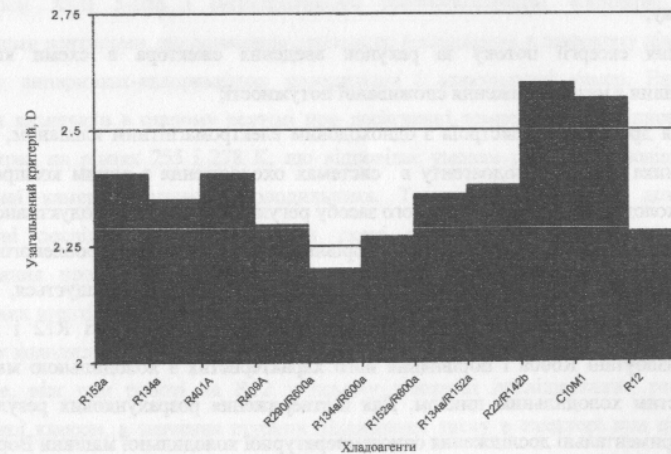


Рис. 7. Порівняльний аналіз альтернативних холодоагентів для R12

Аналогічний підхід був застосований до пошуку холодоагентів альтернативних R22 і R502. Були розглянуті конкуруючі речовини: R134a, R290 і суміші R410A, R407C, R507C, R290/R218, R290/R134a, R290/R152a, R218/R600a, R32/R600a, R218/R152a/R600a, R218/R134a/R600a і R218/R134a/R290.

Проведений багатокритеріальний аналіз показав, що найбільш прийнятною виявляється система R290/R218, у якій досягається компроміс між різними показниками роботи холодильної машини. Таким чином, цілеспрямована модифікація озонобезпечних холодоагентів на основі фторвуглеводнів природними вуглеводневими компонентами є діючим засобом створення нового класу альтернативних азеотропних робочих тіл у холодильній техніці, що дозволяють мінімізувати втрати ексергії між об'єктом охолодження і робочим тілом у порівнянні з перехідними альтернативними багатокомпонентними холодоагентами штучного походження.

В п'ятому розділі дисертації розглянуті різні схемні рішення для циклів холодильних машин, що дозволяють збільшити їхню енергетичну ефективність. Вибір альтернативного робочого тіла практично обумовлює границі енергетичної ефективності експлуатованої холодильної машини. Подальше поліпшення роботи холодильної системи для обраного холодоагенту може бути досягнуте при реалізації нових схемних рішень, у яких тією чи іншою мірою повинні бути відбиті спроби мінімізації джерел незворотних втрат.

У даному розділі розглянуті деякі принципові можливості поліпшення існуючих стандартних схем холодильних машин, зокрема,

- використання циклу Ворхиса для здійснення двоступінчастого стиску в одному циліндрі компресора як ефективного засобу зниження втрат у компресорі при високих ступенях підвищення тиску;
- використання ексергії потоку за рахунок введення ежектора в схеми компресійних холодильних машин з метою зниження споживаної потужності;
- застосування дросельних пристроїв з одноходовим електромагнітним клапаном, що виконує роль розподільника потоку холодоагенту в системах охолодження з одним компресором для двокамерних холодильників, як ефективного засобу регулювання холодопродуктивності.

У дисертації приводяться результати порівняльних досліджень зробленого в Україні герметичного поршневого компресора малої продуктивності, що змащується, у складі холодильної машини Ворхиса при роботі на традиційному холодоагенті R12 і природному холодоагенті - ізобутані R600a і порівняння його характеристик з холодильною машиною, що працює за простим холодильним циклом. Для підтвердження розрахункових результатів були проведені експериментальні дослідження одноступінчастої холодильної машини Ворхиса.

При цьому використовувався компресор побутового холодильника (теоретичний обсяг, описуваний поршнем $V_h = 0,9 \text{ м}^3/\text{ч}$), характеристики якого спочатку були визначені на R12 і

R600a у простому циклі, а потім, після переробки циліндра компресора в циклі Ворхиса. Було виявлено, що в реальних умовах відносний приріст холодопродуктивності склав 11...13 % при роботі на R12 і 19...22 % на R600a. Потужність, споживана компресором, практично не змінилася, що з урахуванням росту холодопродуктивності в цілому привело до збільшення холодильного коефіцієнта в порівнянні з простим циклом.

Як показали проведені дослідження, одним з найбільш ефективних шляхів підвищення економічності систем двоштемпературного охолодження є включення в схему агрегату, що складається з компресора, конденсатора, віддільника рідини, капілярних трубок і паралельно розташованих випарників морозильної і холодильної камер, які з'єднуються в ежекторі. Аналіз показує, що енергію розширення пари, що виходить з випарника холодильної камери, можна використовувати для підтискування в ежекторі пари, що залишає випарник морозильної камери. Наслідком цього є підвищення тиску усмоктування в компресор, збільшення його коефіцієнта подачі. Дане схемне рішення агрегату двокамерного холодильника дозволяє в результаті застосування ежектора використовувати ступінчасте дроселювання, при якому в різних контурах агрегату створюються тиски, що відповідають (з точністю до необхідних температурних напорів на теплопередачу) температурам у камерах. Крім того, відпадає необхідність у відтаванні випарника холодильної камери, тому що температура випару холодоагенту підтримується на рівні 273 °C.

Для визначення основних параметрів і енергетичних характеристик холодильних компресорно-ежекторних агрегатів з різними схемними рішеннями був спроектований експериментальний стенд, оснащений штатним конденсатором холодильника КШД 280/70, компресором ХКВ 5-ЛІБ і регенеративним теплообмінником. Капілярні трубки замінені регулюючими вентилями, що дозволило проводити дослідження в широкому діапазоні температур кипіння у випарниках-калориметрах холодильної і морозильної камер. Енергетичні й інші параметри визначали в сталому режимі при досягненні температур вторинного холодоагенту в калориметрах на рівнях 255 і 278 К, що відповідає умовам роботи, відповідно, морозильної і холодильної камер побутового холодильника. Триходовий вентиль дозволяв проводити порівняльні дослідження з рівнобіжній схемі з включенням і відключенням ежектора. Випробування проводили при різних тисках у випарнику холодильної камери $P_{0\text{хк}}$ для холодильних агентів R12 і R134a. Результати випробувань показують, що зі зменшенням тиску у випарнику холодильної камери тиск усмоктування в компресор при роботі на холодоагенті R134a стає вище, ніж при роботі на R12 у всьому діапазоні досліджуваних тисків у випарнику морозильної камери, а значення ступеня підвищення тиску в ежекторі при цих же умовах для холодоагентів R134a і R12 практично вирівнюються.

Експериментальне дослідження холодильного агрегату з ежектором на перемінних режимах показало, що він працює стійко у всьому діапазоні можливих змін параметрів навколишнього середовища зі збереженням піджимного ефекту ежектора. При менших теплових навантаженнях на камери і високі температури навколишнього середовища ефективність агрегату змінюється незначно внаслідок сталості граничного значення коефіцієнта ежекції для даного ежектора. На основі даних теоретичних і експериментальних досліджень агрегату побутового двокамерного холодильника з ежектором були визначені оптимальні геометричні співвідношення його основних елементів.

Порівняльний аналіз роботи агрегату на R12 і R134a показує, що включення в схему ежектора сприяє значному наближенню енергетичних показників агрегату, який працює на R134a, до аналогічних характеристик при роботі на R12, і створює сприятливі умови для заміни широко розповсюдженого озононебезпечного холодоагенту R12 екологічно чистим R134a. *Розходження в ефективності можна усунути цілком, якщо використовувати нове робоче тіло R134a/R600a (RC).*

Проведено натурні випробування характеристик холодильника КЩД 350/80 з різними варіантами схемних рішень на хладоагентах R12, R134a і RC. Результати досліджень показали, що запропоноване схемне рішення не тільки задовольняє усім вимогам, пропонуваним для холодильників такого класу, але і має більш високі показники.

Однокомпресорні системи охолодження для двокамерних холодильників, що володіють простотою однопотоківих двоховипарних і енергетичними показниками двоагрегатних, можуть бути створені на основі схем з ефективним регулюванням холодопродуктивності. Такі системи складаються з двоховипарної частини, з'єднаної з одним компресорно-конденсаторним агрегатом, дросельним пристроєм з одноходовим електромагнітним клапаном, що виконує роль розподільника потоку холодоагенту.

Прийняті конструктивні рішення дозволили знизити втрати холодопродуктивності в процесі дроселювання і підвищити ефективність холодильного циклу. При цьому максимальна холодопродуктивність агрегату при роботі з відкритим електромагнітним клапаном дорівнює 150 Вт, із закритим клапаном - 80 Вт при споживаній потужності, відповідно, 160 і 120 Вт.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження холодильного агрегату з електромагнітним клапаном для двокамерного холодильника показали, що основною перевагою цього агрегату є можливість одержання двох різних рівнів холодопродуктивності, необхідних при створенні ефективної двоштемпературної системи.

У додатках до дисертації наведені таблиці експериментальних і розрахункових даних термодинамічних властивостей досліджених холодоагентів, експериментально-розрахунковий ілюстративний матеріал по калориметрії компресорів, що підтверджують вірогідність отриманих результатів

ВИСНОВКИ

1. Нові альтернативні двух- і трьохкомпонентні робочі тіла для заміни R12, R22 і R502 у малих холодильних машинах, що об'єднують компромісним образом енергетичну ефективність, екологічну безпеку і економічну доцільність, можуть бути знайдені на основі добавок природних холодоагентів до вже існуючих штучних холодоагентів. Знайдені компромісні холодоагенти для заміни озоноруйнуючих речовин R12, R22 і R502 - суміші R134a/R600a, R152a/R600a, R318/R600a і R218/R600a, R290/R134a, R290/R218, R218/R152a/R600a, R218/R134a/R600a, R218/R134a/R290, відповідно, експериментально досліджені і запатентовані [А.с.1773296(СРСР), Пат. 2088626 (Росія), Пат. PN93A000075(Італія)].

2. Експериментальні дані по фазових рівновагах і параметри різномірних міжмолекулярних взаємодій в однофлюїдних моделях багатокомпонентних холодоагентів:

(R218, R134a, R152a, R32) + **R290**,

(R218, R134a, R152a, R32, RC318) + **R600a**,

(R600, R600a, R290, R218, R152a, RC318, R170) + **R717**,

(R290, R600a, R600) + **R744**

створили основу для проведення термодинамічного аудиту пароконпресорних циклів холодильних машин, що використовують вищевказані суміші.

3. Спрямований пошук азеотропних і близьких до азеотропних двокомпонентних робочих тіл на основі інформації про критичні параметри чистих речовин, доповнений відповідним плануванням і проведенням експерименту по визначенню параметрів різномірних взаємодій у сумішах, являє собою ефективний метод добору холодоагентів серед множини альтернатив, що не піддаються прямому перебору.

4. Експериментальні дані, математичні моделі і аналіз впливу ступеня підвищення тиску і компонентного складу нових робочих тіл на об'ємні й енергетичні показники компресорів малих холодильних машин дозволили створити методи надійної оцінки енергетичних утрат у герметичних компресорах по зовнішніх параметрах.

5. Наступний крок у підвищенні ефективності роботи холодильних машин для обраного холодоагенту може бути зроблений, якщо вдасться поліпшити схему холодильної системи, коли досягається зниження термічних і механічних незворотностей. Запропоновані схеми компресорно-ежекторної системи двоштемпературного охолодження і холодильної машини на основі циклу Ворхиса, ефективність якої була досліджена експериментально, підтвердили можливе зниження енергоспоживання на 20%.

6. Азеотропна суміш хладоагентів R134a/R12 (0.46/0.54) може бути рекомендована для сервісу і тимчасового застосування в побутових компресійних холодильниках параметричного ряду, тому що відпадає необхідність у заміні застосовуваного зараз мінерального компресорного

мастила і знижується вплив агрегатів побутової холодильної техніки на руйнування озонного шару.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Волобуев И.В., Лось В.И., Хмельнюк М.Г. Термодинамические свойства смеси R12B1/R143 // Респ. межведом. научн.-техн. сб. «Холодильная техника и технология»-К.: Техника, 1985. – Вып.39. – С.65-67.
2. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Серебрянский П.В., Цепинь А.М. Исследование характеристик агрегата двухкамерного холодильника, работающего на смеси R12/R744 // Респ. межведом. научн.-техн. сб. «Холодильная техника и технология»-К.: Техника, 1989. – Вып.48. – С.8-12.
3. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Рувинский Г.Я. Термодинамические свойства R507 // Холодильная техника. – 1989. – №10. – С.38-42.
4. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Серебрянский П.В. Энергетические характеристики компрессорно-эжекторного агрегата для производства холода на двух температурных уровнях // Респ. межведом. научн.-техн. сб. «Холодильная техника и технология»-К.: Техника, 1989. – Вып.49 – С.3-6.
5. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Рувинский Г.Я., Возный В.Ф. Энергетические характеристики циклов малой холодильной машины, работающей на R134a // Холодильная техника. – 1990. – №7 – С.14-18.
6. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М. Г., Плужников О.Н., Возный В.Ф. Совершенствование однокомпрессорных двухкамерных бытовых холодильников // Респ. межведом. научн.-техн. сб. «Холодильная техника и технология»-К.: Техника, 1990. – Вып.50 – С.3-8.
7. Лавренченко Г.К., Ермолов В.И., Хмельнюк М.Г., Красновский И.Н. Использование в бытовых холодильниках эффективного рабочего вещества с уменьшенным влиянием на озоновый слой // Передовой производственный опыт. – 1990. – №12. – С.34-36.
8. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Красновский И.Н. Исследование герметичного компрессора ХКВ6 - 1ДБ на хладоне R134a // Передовой производственный опыт. – 1990. – №12. – С.36-38.
9. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М. Г., Плужников О.Н., Возный В.Ф. Повышение энергетической эффективности двухкамерных бытовых холодильников // Холодильная техника. – 1991. – №2 – С.5-7.
10. Водяницкая Н.И., Колесниченко В.С., Хмельнюк М.Г., Мельников В.Д., Цепинь А.М., Капинус Н.М. Исследование компрессора бытового холодильника на перспективных холодильных

- агентах // Респ. межведом. научн.-техн. сб. «Холодильная техника и технология»-К.: Техника, 1991. – Вып.53. – С.38-41.
11. Lawrentschenko G.K., Khmelnyuk M.G. Gibt es eine Alternative für die Alternative R134a ? // Ki Klima-Kalte-Heizung. – 1992. – №6. – S.212-214.
 12. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Кривосовский И.Н., Терентьев С.А. Результаты сравнительных исследований бытовых холодильников на R12 и азеотропной смеси R134a-R12 // Респ. межведом. научн.-техн. сб. «Холодильная техника и технология»-К.: Техника, 1992. – Вып.54. – С.16-21.
 13. Чан Ань Кыонг., Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г. Исследование фазовых равновесий в смеси хладагентов R21-R218 // Респ. межведом. научн.-техн. сб. «Холодильная техника и технология»-К.: Техника, 1992. – Вып.54. – С.55-59.
 14. Lawrentschenko G.K., Khmelnyuk M.G. Zum Einsatz von Strahlverdichtern in Haushalts-Kühlschränken // Die Kälte und Klimatechnik. – 1992. – № 11. – S.828-830.
 15. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г. Перевод бытовой холодильной техники на хладагент R134a // Холодильная техника. – 1992. – №11-12 – С.21-24.
 16. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Терентьев С.А., Шелухина А.А. Экспериментальное исследование компрессорно-эжекторного агрегата на хладагоне R12 и R134a // Респ. межведом. научн.-техн. сб. «Холодильная техника и технология»-К.: Техника, 1994. – Вып.56. – С.42-47.
 17. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М. Г., Плужников О.Н., Возный В.Ф. Теплоэнергетические характеристики элементов компрессионных агрегатов бытовых холодильников при работе на R134a // Респ. межведом. научн.-техн. сб. «Холодильная техника и технология -К.: Техника, 1994. – Вып.56. – С.12-18.
 18. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Рувинский Г.Я., Серебрянский П.В. Исследование компрессора и агрегата бытового холодильника на смеси R218/R21 // Респ. межведом. научн.-техн. сб. «Холодильная техника и технология»-К.: Техника, 1992. – Вып.55. – С.18-24.
 19. Lavrentschenko G.K., Khmelnyuk M.G., Ruvinskij G.Ya., Iljushenko S.V. Thermodynamic properties of a new refrigerant a binary azeotrop based on R152a and R218 // Int. J. Refrig. Vol. 17, No. 7. - 1994. - P. 461-468.
 20. Lavrentschenko G.K., Zmitrochenko J.V., Nesterenko S.M., Khmelnyuk M.G. Characteristics of Voorhees refrigerating machine with hermetic piston compressor producing refrigeration at on or two temperature levels // Int. J. Refrig. Vol. 20, No. 7. - 1998. – P. 517-527.
 21. Хмельнюк М.Г. Смеси углекислоты с углеводородами как натуральные хладагенты холодильных машин // Холодильная техника и технология. – 1998. – Вып. 59. – С. 63-68.

22. Хмельнюк М.Г. Энергетические характеристики бытовой холодильной техники, работающей на азеотропной смеси R134a/R600a // Холодильная техника и технология. – 1999. – Вып. 60 – С. 24-27.
23. Хмельнюк М.Г. Энергетическая эффективность холодильных машин, работающих на смесях на основе аммиака // Холодильная техника и технология. – 1999. – Вып. 61. – С. 53-56.
24. Хмельнюк М.Г. Новые азеотропные смеси холодильных агентов как альтернатива R22 и R502 // Холодильная техника и технология. – 1999. – Вып. 63. – С. 44-47.
25. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Рувинский Г.Я., Дьяченко О.В. Метод расчета фазовых равновесий бинарных смесей – рабочих тел холодильных и криогенных систем // Холодильная техника и технология. – 2001. – № 1(70). – С. 22-27.
26. Хмельнюк М.Г., Еклема А.П., Савичев В.П., Возный В.Ф. Определение шумовых характеристик герметичного компрессора ХКВ-6.65 при работе на различных рабочих телах // Холодильная техника и технология. – 2002. – №3 (77). – С. 38-42.
27. Хмельнюк М.Г., Лавренченко Г.К. Углеводороды и смеси на их основе как рабочие тела малых холодильных машин // Холодильная техника и технология. – 2002. – № 5 (79), 6 (80). – С. 16-20.
28. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г. Совершенствование холодильной машины с дозарядкой хладагентом цилиндра компрессора. I. Производство холода на одном уровне температур // Технические газы. – 2003. – №2. – С.16-23.
29. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г. Углеводороды и смеси на их основе как эффективные рабочие тела холодильных машин // Технические газы. – 2003. – №3. – С.15-23.
30. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г. Совершенствование холодильной машины с дозарядкой хладагентом цилиндра компрессора. II. Производство холода на двух температурных уровнях // Технические газы. – 2003. – №4. – С.4-7.
31. А.с. 571498 СССР, МКИ С 09 К 5/00// F 25 В 1/00. Хладагент для низкотемпературных холодильных машин / А.П.Кузнецов, И.В.Волобуев, В.Г.Сальков, М.Г.Хмельнюк.- №2358939/06; Заявлено 11.05.76; Оpubл. 05.09.77, Бюл. №33.
32. А.с. 1362739 СССР, МКИ С 09 К 5/06. Холодильный агент R-507 / А.П.Кузнецов, Д.И.Ерёмченко, М.Г.Хмельнюк. - №3962884/31 – 26; Заявлено 05.10.85; Оpubл. 30.12.87, Бюл. № 48.
33. А.с. 1773926 СССР, МКИ С 09 К 5/00. Холодильный агент / Г.К. Лавренченко, М.Г. Хмельнюк, В.И. Ермолов, И.Н. Красновский, И.Г. Трукшина и В.Г. Барабанов. - №4834824/26; Заявлено 02.04.90; Оpubл. 07. 11.92, Бюл. № 41.
34. Пат. 2088626 Россия, МКИ С 09 К 5/04. Рабочая смесь для холодильных машин / Барабанов В.Г., Беляев А.Ю., Егоров С.Б., Кондратьев Ю.Р., Коротеев А.С., Пономарев-Степной Н.Н.,

- Рувинский Г.Я., Хмельнюк М.Г., Чикуров С.К. - №94015395/04; Заявлено 27.04.94; Оpubл. 27.08.97, Бюл. № 24.
35. Пат. PN93A000075 Италия, МКИ С 09 К 5/ 00. Fluids for refrigerant circuits / М. Bellomo, L. Pol , М. Khmelnjuk, G. Lavrenchenko, O. Plugnicov, V. Voznij . Заявлено 15.12.93. Оpubл. 03.12.94.
36. А.с. 1483202 СССР, МКИ F 25 В 1/10. Фреоновый холодильник / Г.К.Лавренченко, М.Г.Хмельнюк, Д.И.Буяджи, П.В. Серебрянский, В.Ф. Возный.-№ 4195673/31-13 (22); Заявлено 07.02.87; Оpubл. 16.09.89 , Бюл. №20
37. А.с. 1652772 СССР, МКИ 5 F 25 В 9/02. Двухкамерный холодильник / Г.К.Лавренченко, М.Г.Хмельнюк, С.В.Котенко, А.А.Кузьмин, П.В.Серебрянский.-№ 7689596/06 (22) ; Заявлено 15.05.89; Оpubл. 30.05.91, Бюл. №20
38. А.с. 1762087 СССР, МКИ 5 F 25 В 15/00. Холодильная машина / Г.К. Лавренченко, М.Г. Хмельнюк, Л.И.Морозюк, С.Я.Яровой, П.В.Серебрянский.-№4852026/06 (22) ; Заявлено 18.07.90; Оpubл. 15.10.92 , Бюл. №34.
39. А.с. 1806315 А3 СССР, МКИ F 25 D 11/02. Компрессионный холодильный агрегат / И.Н. Красновский, В.И.Ермолов, Г.К.Лавренченко, Н.В.Ильин, М.Г.Хмельнюк.-№4889615/06; Заявлено 12.12.90; Оpubл. 30.03.93, Бюл. №12.
40. Лавренченко Г.К., Кузнецов А.П., Хмельнюк М.Г. Применение азеотропной смеси R507 для улучшения характеристик холодильного агрегата с герметичным компрессором. Деп. в УкрНИИТИ 04.06.88, №1060 – Ук88.
41. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Возный В.Ф., Плужников О.Н. Повышение эффективности однокомпрессорных агрегатов двухкамерных бытовых холодильников/ Деп. в УкрНИИТИ 12.09.88., №2324 – Ук88.
42. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Возный В.Ф., Плужников О.Н., Терентьев С.А. Исследование энергетических характеристик герметичных компрессоров на новых озонобезопасных рабочих телах./ Деп. в УкрНИИТИ 14.10.92, №1599 – Ук92.
43. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Рувинский Г.Я., Канаев В.В. Характеристики циклов малой холодильной машины, работающей на хладагенте R134a, и проблемы его использования в бытовых компрессионных холодильниках./ Деп. в УкрНИИТИ 24.10.89, №2260 – Ук89.
44. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Возный В.Ф., Плужников О.Н., Терентьев С.А. Исследование теплоэнергетических характеристик элементов холодильных агрегатов бытовых холодильников при работе на хладоне R134a/ Деп. в УкрНИИТИ 13.08.92., №1226 – Ук92.
45. Ильюшенко С.В., Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г. Измерения коэффициента теплопроводности R507/ Деп. в УкрНИИТИ 10.05.89, №1223 – Ук89.

Статті і доповіді в працях конференцій

46. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Канаев В.В. Усвѣршенствоване на агрегатите за двакамерните домашни хладилници // Тезисы доклада на юбилейной научной сессии «Развитие на хладилната техника», София, октябрь 1988. – С.19-20.
47. Хмельнюк М.Г., Канаев В.В., Серебрянский П.В. Применение многокомпонентных рабочих тел для повышения энергетической эффективности бытовых систем двухтемпературного охлаждения // Тез. док. Всесоюз. науч.-практ. конф. «Пути интенсификации производства с применением искусственного холода в отраслях агропромышленного комплекса, торговле и на транспорте», октябрь 1989, Одесса, ОИНТЭ, 1989. – С.36
48. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г. Проблемы перевода холодильной техники на озоноразрушающие хладагенты // Материалы I международной конф. «Экологические проблемы городов и промышленных регионов» 16-21 сентября 1991. Одесса. С.68
49. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г. Исследование нового озоноразрушающего вещества бытовой холодильной техники // Тез. док. Всесоюз. науч.-практ. конф. «Холод – народному хозяйству», октябрь 1991. – С.-Петербург, изд-во ЛТИХП, 1991. – С. 84.
50. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Терентьев С.А. Применение компрессорно-эжекторного агрегата для систем двухкамерного охлаждения бытовых холодильников // Тез. док. Всесоюз. науч.-практ. конф. «Холод – народному хозяйству», октябрь 1991. – С.-Петербург, изд-во ЛТИХП, 1991. – С. 130.
51. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Цепинь А.М., Серебрянский П.В. Результаты сравнительных испытаний герметичного поршневого компрессора при работе на R134a и R12 // Тез. док. Всесоюз. науч.-практ. конф. «Холод – народному хозяйству», октябрь 1991. – С.-Петербург, изд-во ЛТИХП, 1991. – С. 83.
52. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Артеменко Н.И., Канаев В.В. Проблемы перевода судовых холодильных установок на экологически чистые хладагенты // Тез. док. Респ. науч.-практ. конф. «Создание разнообразных экологически чистых систем получения инертных газов и связанная с этим природоохранная политика предприятий», 1991, ИПК Минморфлота, Одесса. С. 36.
53. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Рувинский Г.Я., Проблемы перевода холодильной техники на озоноразрушающие хладагенты // Материалы I международной конференции «Экологические проблемы городов и промышленных регионов» 16-21 сентября 1991. Одесса. С.49.
54. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Красновский И.Н. Исследование нового озоноразрушающего вещества бытовой холодильной техники // Тез. док. Всесоюз. науч.-

- практ. конф. «Холод – народному хозяйству», октябрь 1991. – С.-Петербург, изд-во ЛТИХП, 1991. – С. 84.
55. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г. О проблемах замены R22 на озоноразрушающие холодильные агенты // Материалы II международной конференции «Проблемы экологии и ресурсосбережения для сельскохозяйственных районов и агропромышленных комплексов», август 1992. – Одесса. – С.76.
56. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г. Имеется ли альтернатива альтернативному хладагенту R134a // Материалы II международной конференции «Проблемы экологии и ресурсосбережения для сельскохозяйственных районов и агропромышленных комплексов», август 1992. – Одесса. – С.49
57. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Тихонова Е.А. Эффективные многокомпонентные рабочие тела на основе фторуглеродов для малых холодильных машин с герметичными компрессорами // Материалы международной конференции «Химия, технология и применение фторсоединений в промышленности», май 1994. – С.-Петербург. – С.56
58. Lavrentschenko G.K., Khmelnyuk M.G., Tihonova E.A. Thermodynamic aspects of using mixtures of substances in refrigerating machines // Proc. of the Int. Cong. « CFCs, THE DAY AFTER». – Padova. – 1994. – P. 65-70.
59. Lavrentschenko G.K., Khmelnyuk M.G., Ruvinskij G.Ya. Description of binary mixtures including oil-refrigerant mixtures by means of unified virial equation of state // Proc. of the Int. Cong. « CFCs, THE DAY AFTER». – Padova. Italy. – 1994. – P. 479-484.
60. Khmelnyuk M.G., Voznyj V.F., Pluznikov O.N. Research of Technical Characteristics of Compressors by using of Freon 12 and alternative Refrigerants R134a, R600a and R290 in small cooling circuit // Proc. of the Scientific and technical seminar «The Days of New Technique ^95». – 1995. – Zlate Moravce. Slovac. – P. 38-46.
61. Khmelnyuk M.G., Voznyj V.F., Pluznikov O. Elaboration of the programme modules for Description of thermodynamic properties of pure hydrocarbons and their mixtures // Proc. of the Scientific and technical seminar «The Days of New Technique ^95». – 1995. – Zlate Moravce. Slovac. – P. 23-24.
62. Хмельнюк М.Г., Лавренченко Г.К., Тихонова Е.А. Новые азеотропные озонобезопасные холодильные агенты для замены R12, R22 и R502 // Тез. док. IV Международной конференции по экологии «Экология, продукты питания, здоровье» октябрь 1995. – Одесса: ОГАХ, 1995. – С. 68.
63. Дьяченко О.В., Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г. Смеси на базе аммиака – перспективные рабочие тела малых холодильных машин // Тез. док. IV Международной конференции по экологии «Экология, продукты питания, здоровье» октябрь 1995. – Одесса: ОГАХ, 1995. – С.

64. Khmelnyuk M.G., Voznyj V.F., Pluznikov O.N. Vyskum alternativnych chladivaich za chladivo R22 // Proc. of the Medrinarodna konferencia o komoresoroch a chladivach «Kompresory 95». - 5.10. 1995. - Vysoce Tatry. Slovak. - P. 261-267
65. Khmelnyuk M.G., Voznyj V.F., Pluznikov O.N., Nielsen O. Investigation of the energy efficiency of the compressor XKB 6.65 on isobutane // Proc. Conf. «Application for Natural Refrigerants» - Aarhus (Denmark). - 1996. - P.630-636.
66. Lavrentshenko G.K., Djachenko O.V., Khmelnyuk M.G., Nielsen O.R. The simulation energy efficiency of a refrigeration machine using natural refrigerant (mixtures based on ammonia) // Proc. Conf. «Application for Natural Refrigerants» - Aarhus (Denmark). - 1996. - P. 707-713.
67. Khmelnyuk M.G., Zmitrochenko J.V., Lavrentchenko G.K. Energy characteristics of refrigerating machine working with mixture of natural fluids: carbon dioxide and hydrocarbons // Preprints Joint Meeting of the Int. Institute of Refrigeration. Sections B and E «Natural Working Fluids 98». Oslo (Noprtway). - 1998. - P.433-439.
68. Возный В.Ф., Хмельнюк М.Г., Мельников В.Д., Водяницкая Н.И. Расчетно-аналитическое прогнозирование параметров агрегатов ВС и ВН при переводе их на холодильные агенты R134a и R404a // Сборник научных трудов 2-ой Международной научно-технической конф. «Современные проблемы холодильной техники и технологии». - Одесса: Издательство ОГАХ. - 2002. - С. 94
69. Хмельнюк М.Г., Лавренченко Г.К., Возный В.Ф. Применение чистых углеводородов и их смесей в малых холодильных машинах // Сборник научных трудов 2-ой Международной научно-технической конф. «Современные проблемы холодильной техники и технологии». - Одесса: Издательство ОГАХ. - 2002. - С. 100-101.
70. Лавренченко Г.К., Хмельнюк М.Г., Савичев В.П. Многокомпонентные рабочие тела на основе аммиака // Сборник научных трудов 3-й Международной научно-технической конф. «Современные проблемы холодильной техники и технологии». - Одесса: Издательство ОГАХ. - 2003. - С. 6-7.

АНОТАЦІЯ

Хмельнюк М.Г. Науково-технічні основи вдосконалення малих холодильних машин (альтернативні холодоагенти, схемні рішення). - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – Холодильна і криогенна техніка, системи кондиціонування. Одеська державна академія холоду, м. Одеса, 2003 р.

Дисертація присвячена розробці науково-технічних основ і рекомендацій, що знизили би темпи росту енергоспоживання малих холодильних машин (МХМ), шляхом перекладу існуючих і

нових МХМ на ефективні холодоагенти, альтернативні насамперед озоноруйнуючим холодоагентам R12, R22 і R502, створенню нових схемних рішень агрегатів холодильних машин. У роботі наведено результати дослідження термодинамічних властивостей нових озоноруйнівних холодоагентів. Наведено результати експериментальних досліджень різноманітних холодильних машин і агрегатів. Показано, що використання здобутих результатів визначає технічні рішення, які забезпечують підвищення енергетичної ефективності холодильного обладнання при зниженні антропогенного навантаження на навколишнє середовище. Результати роботи знайшли застосування в проектуванні холодильного обладнання.

Ключові слова: холодоагент, термодинамічні властивості, компресор, холодильний агрегат, енергетична ефективність.

АННОТАЦИЯ

Хмельнюк М.Г. Научно-технические основы совершенствования малых холодильных машин (альтернативные хладагенты, схемные решения). - Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.05.14 – Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования. Одесская государственная академия холода, г.Одесса, 2003 г.

Диссертация посвящена созданию научно - технических основ совершенствования малых холодильных машин путём перевода существующих и новых холодильных машин на новые эффективные хладагенты, альтернативные озоноразрушающим R12, R22 и R502, совершенствованию и созданию новых схемных решений агрегатов холодильных машин.

Для осуществления поставленных в диссертации задач разработаны и исследованы новые рабочие тела холодильных машин – азеотропные смеси альтернативных и натуральных хладагентов. Исследованы фазовые равновесия и составлены уравнения состояния для хладагентов (R218, R134a, R152a, R32) + R290, (R218, R134a, R152a, R32, RC318) + R600a, (R600, R600a, R290, R218, R152a, RC318) + R717, (R290, R600a, R600, R170) + R744. Проведены сравнительные калориметрические исследования малых герметичных холодильных компрессоров и агрегатов на различных рабочих телах. Результаты проведенных исследований легли в основу разработанной обобщенной модели объёмных и энергетических характеристик герметичных компрессоров. Рассмотрены вопросы применения в малых холодильных машинах натуральных рабочих тел. Значительное внимание уделено гетероазеотропным рабочим телам на основе аммиака – малоизученному классу хладагентов, для которого практически отсутствует экспериментальная информация. Разработаны и исследованы новые схемные решения агрегатов холодильных машин позволяющих снизить энергопотребление холодильного оборудования. На основании многокритериального анализа включающего рассмотрение объёмных и энергетических

характеристик холодильных машин предложены наиболее предпочтительные альтернативные хладагенты для замены R12, R22 и R502.

Ключевые слова: хладагент, термодинамические свойства, компрессор, холодильный агрегат, энергетическая эффективность.

ABSTRACT

Khmelnjuk M.G. Scientific and technological fundamentals of small refrigerating machine development (alternative refrigerants, scheme decisions). - Manuscript.

Thesis for doctor's degree by specialty 05.05.14 – Refrigeration, cryogenics and systems of air-conditioning. State Academy of Refrigeration Odessa, 2003.

The dissertation is devoted the scientific and technological fundamentals of small refrigerating machine (SRM) development to decrease energy consumption by the replacement of the ozone-depletion refrigerants R12, R22 and R502 and creation of the new design solutions. The new class of refrigerants based on improvement of alternative working fluids by the natural refrigerants is proposed. Thermodynamic properties of natural and artificial refrigerant azeotropic mixtures are studied and performance characteristics of refrigerating machines are estimated. Experimental investigations of various types of small refrigerating machines and compressors are carried out. It is shown that proposed technical solutions and new refrigerants increase an energy efficiency of refrigerating machines and decrease an environmental impact. The results of research have found a wide range of applications in refrigerating machinery.

The key words: refrigerant, thermodynamic properties, compressor, refrigerating machines, energy efficiency.

