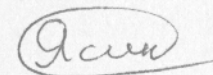


Авторефер  
Я 81

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ



ЯСИНСЬКИЙ СЕРГІЙ ПЕТРОВИЧ

УДК 621.564; 641.546.44

**БІНАРНІ ХОЛОДОАГЕНТИ НА ОСНОВІ АМІАКУ –  
РОБОЧІ РЕЧОВИНИ МАЛИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН**

05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка,  
системи кондиціонування

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2013

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Інституті холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського Одеської національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**ХМЕЛЬНЮК МИХАЙЛО ГЕОРГІЙОВИЧ**,  
завідувач кафедри холодильних машин і установок Інституту холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В.С.Мартиновського Одеської національної академії харчових технологій МОН України.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**РАДЧЕНКО МИКОЛА ІВАНОВИЧ**,  
завідувач кафедри кондиціонування та рефрижерації Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова МОН України;

кандидат технічних наук, доцент  
**МАЛЬЧЕВСЬКИЙ ВАЛЕНТИН ПАВЛОВИЧ**,  
доцент кафедри «Суднові енергетичні установки і технічна експлуатація» Одеського національного морського університету МОН України.

Захист відбудеться «23» травня 2013 року о 11<sup>00</sup> годині в аудиторії 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

...ротацію можна ознайомитися у бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

«23» квітня 2013 р.

Мілованов В.І.

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Визнання Україною міжнародних угод щодо запобігання руйнування озонового шару та зменшення емісії парникових газів призвело до пошуку альтернативних робочих речовин в області систем отримання штучного холоду. Основним методом переходу від сучасних галогензамішених вуглеводнів до екологічно безпечних робочих речовин є повернення до використання природних холодоагентів (аміаку, вуглеводнів, вуглекислого газу, води і повітря), які існують в природі та не впливають на навколишнє середовище негативним чином.

Аміак є одним з найбільш популярних холодоагентів у великих промислових системах, особливо у сфері виробництва та зберігання харчових продуктів. Однак він має ряд негативних якостей, які обмежують його використання в техніці помірному холоду, а саме: токсичність, корозія при взаємодії з міддю, нерозчинність з традиційними мастилами, висока температура пари при стисненні в компресорі. Одним з можливих напрямків для усунення негативних якостей є додавання компонентів, які б компенсували перераховані недоліки і підкреслили екологічні, енергетичні та економічні переваги отриманого холодоагенту. В якості компонентів для сумішей використано холодоагенти з низьким коефіцієнтом глобального потепління.

В даний час перед проектувальниками холодильного обладнання виникла задача розробки нової техніки, яка характеризується мінімальним енергоспоживанням, високим ступенем експлуатаційної безпеки і мінімальним негативним впливом на навколишнє середовище. Таким чином, пошук нових робочих речовин на основі природних холодоагентів, що відповідають сучасним екологічним вимогам, робить актуальними дослідження в галузі пошуку нових композицій холодоагентів для холодильних машин, які здатні спростити використання природних холодоагентів і привести до поліпшення енергетичних і експлуатаційних показників холодильної машини в цілому.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана у відповідності з програмою фундаментальних і пошукових досліджень, які відповідають Постанові Верховної Ради України від 4.02.2004 р. про ратифікацію Київського Протоколу; Постанові Кабінету Міністрів України № 624 від 16.05.2002 р. «Про посилення державного регулювання ввозу і вивозу з України озоноруйнівних речовин»; Постанові Кабінету Міністрів України № 256 від 04.03.2004 р., яка затвердила «Програму припинення виробництва та використання озоноруйнівних речовин до 2030р.»; Постанові Кабінету Міністрів України № 274-111 (2274-14) від 22.02.2001 р. «Енергетична стратегія України на період до 2030 року».

**Мета і завдання дослідження.** Мета цієї роботи полягає у розробці та дослідженні робочих речовин холодильних машин на основі сумішей аміаку, які дозволяють поліпшити енергетичні та експлуатаційні характеристики парокompресійних циклів холодильних машин.

Для досягнення поставленої мети були поставлені і вирішені наступні основні завдання:

xv 1055

ІНСТИТУТ ХОЛОДУ  
ОНАХТ  
бібліотека

ГАЛУЗЕВИЙ

- пошук робочих речовин на базі аміаку, які дозволяють поліпшити енергетичні та експлуатаційні характеристики роботи компресора та відповідають сучасним екологічним вимогам;
- дослідження термодинамічної і фазової поведінки суміші R717/R152a на розробленому експериментальному стенді;
- експериментальне дослідження енергетичних та експлуатаційних характеристик роботи компресора, у якому в якості робочих речовин використовуються суміші на основі аміаку.

**Об'єктами дослідження** є малі аміачні парокомпресійні холодильні машини, що використовують в якості робочих речовин суміші природних холодильних агентів.

**Предметом дослідження** є показники енергетичної ефективності роботи холодильних машин на сумішах на базі аміаку.

**Методи дослідження.** Експериментальне дослідження термодинамічної і фазової поведінки системи аміак-діфторетан, експерименти з визначення показників енергетичної ефективності холодильних машин, порівняння результатів розрахунку з результатами експерименту.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

- вперше експериментально отримані енергетичні характеристики роботи компресора на суміші R717/R152a, що показують доцільність використання дослідженої суміші у якості робочої речовини малих холодильних машин;
- вперше отримані експериментальні дані по термодинамічній і фазовій поведінці суміші R717/R152a, що дозволяє прогнозувати властивості суміші за певних умов;
- на основі рівнянь стану Пенга-Робінсона, з урахуванням експериментальних даних, були розраховані термодинамічні властивості системи R717/R152a та побудована діаграма стану тиск-ентальпія, що дає можливість виконувати розрахунки термодинамічних циклів холодильних машин, що працюють на даній суміші.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** визначаються:

- правильною постановкою завдань і перевіркою адекватності теоретичних моделей енергетичної ефективності холодильних машин і експериментальних даних;
- використанням сучасних математичних методів і програмних модулів при вирішенні задач прогнозування термодинамічної і фазової поведінки суміші R717/R152a.

**Практичне значення отриманих результатів.** У ході досліджень енергетичних характеристик компресора та холодильного обладнання був отриманий обсяг даних про роботу холодильної машини на нових холодоагентах. Отриманий матеріал дозволить здійснити заходи щодо впровадження в промисловий комплекс науково-технічних пропозицій, розроблених за участю автора, що сприятиме реалізації Україною прийнятих зобов'язань з дотримання Монреальського та Кіотського Протоколів. Запропоновані в роботі рішення використовуються в

розробках при проектуванні холодильної техніки в УкрНДІБитМаш (м. Донецьк), в ОЕЗ ІПІ «Біотехніка» НААН» (м. Балта).

**Особистий внесок здобувача** підтверджується науковими публікаціями, в яких відображені основні ідеї і положення теоретичних розробок і експериментальних результатів. Особисто автором було проведено експериментальне дослідження термодинамічної і фазової поведінки суміші аміак-діфторетан, здійснено розрахунок термодинамічної ефективності циклів холодильних машин для сумішей на основі аміаку, проведено експериментальні дослідження роботи холодильної машини на сумішах на основі аміаку, проведено порівняльний аналіз експериментальних і розрахункових результатів. У процесі роботи над дисертацією за безпосередньої участі здобувача був створений експериментальний стенд для вивчення термодинамічної і фазової поведінки сумішей; експериментальний стенд для теплотехнічних випробувань компресорів, обґрунтовано вибір об'єктів дослідження і розроблені сучасні підходи до їх вивчення.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень були представлені та обговорювалися на 6-й міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», Одеса, 2009; міжнародній науковій конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», Миколаїв, 2010; міжнародній конференції «Інноваційні розробки в області техніки і фізики низьких температур», Москва, 2010; міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», Одеса, 2011; 23-й міжнародній науково-технічній конференції «International Congress of Refrigeration», Прага (Чеська Республіка), 2011; 6-й всеукраїнській науково-технічній конференції «Удосконалення малої холодопелотехніки – використання холоду в харчовій галузі», Донецьк, 2012; 3-й міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», Миколаїв, 2012; 1-й міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства», Львів, 2012.

**Публікації.** Основний зміст дисертації представлено у 9 статтях, у тому числі 6 опублікованих у фахових наукових виданнях та збірниках наукових праць, які відповідають вимогам МОН України. У вигляді тез доповідей у збірниках наукових робіт регіональних та міжнародних конференцій опубліковано 6 статей.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку використаної літератури, що включає 142 джерела. У ній міститься 116 сторінок основного тексту, 9 таблиць і 54 малюнок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертації, відображається зв'язок з державними програмами і темами, сформульована мета і задачі досліджень. Наведено нові наукові результати, конкретний особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів і основні публікації.

У **першому розділі** проведено огляд та аналіз історії розвитку холодильних агентів. Огляд показує, що за останні десятиліття вже змінилися декілька поколінь холодоагентів. Деякі речовини, які до недавнього часу вважалися новітніми та екологічно безпечними, сьогодні виводяться з використання. Тому проблема пошуку

нових холодоагентів, таких, що не завдають шкоди навколишньому середовищу, мають високу термодинамічну ефективність і здатних забезпечити безпечну експлуатацію холодильних установок, сьогодні актуальна як ніколи.

Розглядається питання про те, що в даний час змінилися критерії вибору холодильних агентів. Так, якщо раніше основним критерієм вибору холодоагентів були термодинамічні властивості, то сьогодні ситуація змінилася. Завдяки Монреальському та Кіотському протоколам більшість холодоагентів, які застосовувалися раніше і мали практично ідеальні термодинамічні властивості, потрапили під заборону і були заборонені для використання в новому обладнанні. У свій час така доля спіткала холодоагенти R11 і R12, тепер приходить час і відмови від R22.

Більшість європейських країн у питанні екології просунулися ще далі. Активно впроваджуються нові екологічні програми, такі як Європрограма 20-20-20, заборона фторовмісних холодоагентів та інші. Це призвело до того що, наприклад, в Данії максимальна заправка холодоагентами HFC обмежена 10 кг. У європейських країнах переходять на природні холодоагенти – аміак, вуглеводні, вуглекислий газ. Так, наглядові органи Німеччини не контролюють використання систем, що містять менше 3 тонн аміаку. При нинішньому рівні холодильного машинобудування, коли на 1 кВт холоду витрачається менше 100 грам аміаку, подібні дозволи практично звільняють від нагляду всі можливі системи промислового штучного холоду. У Європі в 2011 році функцінувало більше 2000 холодильних машин, що працюють на CO<sub>2</sub>, з використанням транскритичного циклу.

Розглянуто методику оцінки вибору холодоагенту з урахуванням всього життєвого циклу холодильної установки. Для холодильної техніки очевидно, що витрата енергії в період експлуатації вносить найбільший вклад у вплив на навколишнє середовище за рахунок виділення діоксиду вуглецю в атмосферу.

Також розглянуті експериментальні дослідження різних авторів, що стосуються переведення холодильної техніки на природні холодоагенти. Як показують експерименти, холодоагенти R12, R22, R134a, R404A і R407C цілком можна замінити природними холодоагентами, такими як R290, R600a, R1270, причому зробити це можна в існуючих системах без серйозних модернізацій і, в більшості випадків, без шкоди енергетичній ефективності.

У **другому розділі** обґрунтований вибір компонентів для досліджуваної суміші. Розглянуто типи фазової поведінки в сумішах на основі аміаку. На спроектованому експериментальному стенді проведені дослідження взаємної розчинності і фазових рівноваг суміші R717/R152a у всьому діапазоні концентрацій. Проведений аналіз та обробка отриманих результатів, визначена нормальна температура кипіння суміші у всьому діапазоні концентрацій. Запропоновано декілька варіантів кореляцій для опису термодинамічних властивостей досліджуваної суміші і визначена азеотропна концентрація суміші.

В якості компонентів суміші нами було запропоновано використання аміаку та діфторетана (R152a). Вибір діфторетана обґрунтований насамперед його екологічними властивостями – він має нульовий коефіцієнт руйнування озонного шару і потенціал глобального потепління GWP=140. Це один з небагатьох холодоагентів, який задовольняє вимогам Монреальського та Кіотського протоколів.

В даний час активно досліджуються і пропонуються нові суміші на основі аміаку. Відмінно себе показала суміш R723. Активно проводяться робота в галузі дослідження аміаку з природними холодоагентами, зокрема з вуглеводнями. Непогані результати показали суміші R717/R218, R717/R290, R717/R318. Наведені вище суміші аміаку дозволяють поліпшити термодинамічні характеристики циклів, знизити термонапруженість компресора, а також поліпшити розчинність аміаку з мінеральними мастилами.

Експериментальні дослідження взаємної розчинності бінарної суміші R717/R152a були проведені за допомогою вимірювального осередку, що реалізує статичний синтетичний метод з візуальним спостереженням за появою міжфазної межі розділу фаз (рідина-рідина).

Суміш R717/R152a була досліджена у всьому діапазоні масових концентрацій, в температурному діапазоні (-75)-(+50) °C. В результаті експерименту криві розшарування не були помічені і поведінка рідини відповідала поведінці гомогенного розчину. Звідси можна зробити висновок, що в досліджуваному інтервалі температур суміш R717/R152a характеризується повною взаємною розчинністю у всьому діапазоні концентрацій.

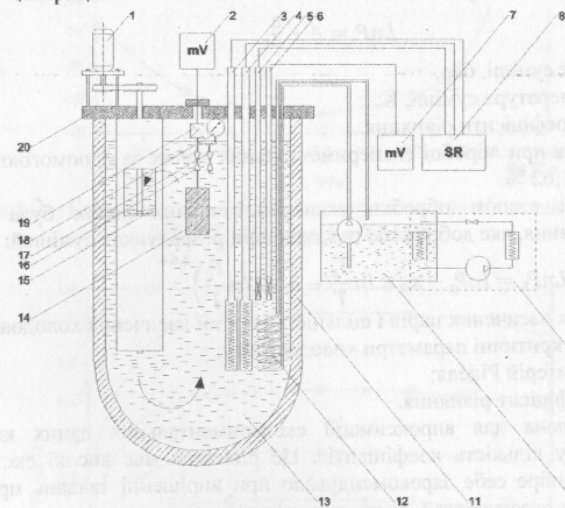


Рисунок 1 – Схема експериментального стенду для дослідження фазових рівноваг:

- 1 - електродвигун, 2, 7 - мілівольтметр, 3 - розгінний нагрівач; 4 - регульований нагрівач; 5 - платиновий термометр опору системи регулювання; 6 - платиновий термометр опору для вимірювання температури; 8 - система регулювання температури; 9 - холодильна машина; 10 - бак-акумулятор; 11 - термостат; 12 - теплообмінник; 13 - уайт-спірит; 14 - вимірювальний осередок; 15 - механічна мішалка; 16, 17 - запірний вентиль; 18 - зразковий манометр; 19 - перетворювач тиску; 20 - кришка термостата.

Схема спроектованого експериментального стенду для дослідження фазових рівноваг сумішей представлена на рисунку 1.

При проведенні експерименту до вимірювального осередку заправлялися компоненти суміші в наступних співвідношеннях масових часток: 0/100, 20/80, 30/70, 40/60, 50/50, 60/40, 70/30, 80/20, 100/0 % R717/R152a відповідно. Експеримент проводився за наступних температур: -25, -20, -10, 0, +10, +20, +30, +40 °С для кожної концентрації суміші.

Температура вимірювалася платиновим термометром опору TR-101 та дублювалася ртутним термометром. Тиск вимірювався за допомогою електронного перетворювача тиску WIKA A-10. Як показав аналіз, погрішності вимірювань не перевищували: для температури  $\Delta T = 0,05$  К, для концентрації  $\Delta X = 0,2622$  %, для тиску – 0,2 %.

У ході експерименту була отримана Р-Т-х залежність для кожної досліджуваної концентрації.

Для перевірки отриманих результатів експериментальні дані були оброблені за допомогою рівняння Антуана:

$$\ln P = A - \frac{B}{T} \quad (1)$$

де Р – тиск суміші, бар;

Т – температура суміші, К;

А, В – коефіцієнти рівняння.

Відхилення при обробці експериментальних даних за допомогою рівняння (1) не перевищили 1,62 %.

Наступним етапом обробки експериментальних даних була обробка за допомогою рівняння, яке добре себе показало при розрахунках сумішей:

$$\ln P_s = \ln P_c - \alpha_R \times \ln \frac{T_c}{T} - b \times \left( \ln \frac{T_c}{T} \right)^{2,64} \quad (2)$$

де  $P_s$  – тиск насичених парів і щільність на лінії насичення холодоагенту;

$T_c$ ,  $P_c$  – критичні параметри холодоагенту;

$\alpha_R$  – критерій Ріделя;

b – коефіцієнт рівняння.

Запропонована для апроксимації експериментальних даних кореляція (2) містить невелику кількість коефіцієнтів. Це рівняння має високі екстраполяційні можливості та добре себе зарекомендувало при вирішенні завдань прогнозування термодинамічних властивостей, як чистих речовин, так і розчинів.

Найважче устаткування не дозволило провести експериментальні дослідження і отримати Р-Т-х залежність при температурах суміші нижче (-25) °С. Тому для температур (-30) і (-40) °С значення тисків суміші були розраховані за допомогою рівняння (2).

За допомогою рівняння (2) була визначена температура кипіння суміші при нормальних умовах та побудований графік залежності (рисунк 2). Аналізуючи графік можна спрогнозувати, що явище позитивної азеотропії спостерігається в області концентрації R717/R152a (50/50), кг/кг.

Температура кипіння при азеотропній концентрації даної суміші R717/R152a (50/50), кг/кг склала  $t_s = (-38,8)$  °С при тиску  $P = 0,1$  МПа. Додавка холодоагенту R152a дозволяє знизити температуру кипіння, що покращує термодинамічні характеристики суміші. Графік залежності температури кипіння від концентрації суміші зображений на рисунку 2.

Слід зазначити, що дані тисків, розрахованих за допомогою рівняння (2), мають максимальне відхилення від експериментальних даних до 1,4 %, що є більш прийнятним результатом, ніж обробка експериментальних даних за допомогою рівняння (1).

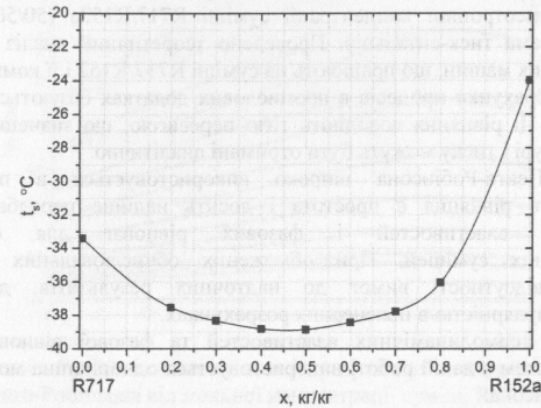


Рисунок 2 – Графік залежності температури кипіння від концентрації суміші R717/R152a при  $P = 0,1$  МПа

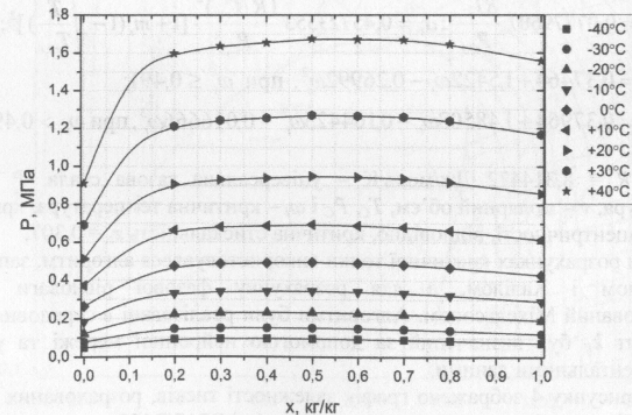


Рисунок 3 – Графік залежності тиску суміші R717/R152a від масової концентрації при досліджуваних температурах

На закінчення можна сказати, що отримані рівняння володіють високими екстраполяційними можливостями та хорошою точністю і можуть бути використані для опису суміші R717/R152a.

В результаті обробки експериментальних даних отримані графіки P-T-х залежності у всьому діапазоні масових (рисунок 3) і мольних концентрацій для суміші R717/R152a.

У **третьому розділі** вирішується задача опису термодинамічних властивостей суміші R717/R152a за допомогою рівнянь стану. Проведено огляд кубічних рівнянь стану, для опису термодинамічних властивостей суміші було обране рівняння Пенга-Робінсона. Для азеотропної концентрації суміші R717/R152a (50/50), кг/кг була побудована діаграма тиск-ентальпія. Проведено теоретичний аналіз енергетичних циклів холодильних машин, що працюють на суміші R717/R152 і її компонентах.

Основні розрахунки процесів в промислових додатках базуються на кубічних рівняннях стану. Ці рівняння володіють тією перевагою, що значення обсягу при заданих температурі і тиску можуть бути отримані аналітично.

Рівняння Пенга-Робінсона широко використовується в промисловості. Перевагами цього рівняння є простота і досить надійне передбачення різних термодинамічних властивостей і фазових рівноваг для бінарних та багатоконпонентних сумішей. При обмежених обчислювальних можливостях комп'ютерів і відсутності вимог до надточних результатів, дані рівняння користуються популярністю в інженерних розрахунках.

Для опису термодинамічних властивостей та фазової рівноваги складних молекулярних систем в даній роботі використовується однорідна модель рівняння стану Пенга-Робінсона:

$$P = \frac{RT}{v - b_i} - \frac{a_i(T)}{v(v + b_i) + b_i(v - b_i)}, \quad (3)$$

$$b_i = 0,07779607 \frac{RT_{c,i}}{P_{c,i}}; a_i = 0,45723553 \frac{(RT_{c,i})^2}{P_{c,i}} \left[ 1 + m_i \left( 1 - \sqrt{\frac{T}{T_{c,i}}} \right) \right]^2; \quad (4)$$

$$m_i = 0,37464 + 1,5422\omega_i - 0,26992\omega_i^2, \text{ при } \omega_i \leq 0,491;$$

$$m_i = 0,37964 + 1,48503\omega_i - 0,164423\omega_i^2 + 0,016666\omega_i^3, \text{ при } \omega_i > 0,491 \quad (5)$$

де  $R = 8,314472$  Дж/моль·К – універсальна газова стала,  $P$  – тиск,  $T$  – температура,  $v$  – молярний об'єм,  $T_c$ ,  $P_c$  і  $\omega_i$  – критична температура, критичний тиск і фактор ацентричності, відповідно, критична стискальність  $z_c = 0,307$ .

При розрахунках критичної точки використовувався алгоритм, запропонований Хайдеманом і Халілом, а для розрахунку фазової рівноваги – алгоритм запропонований Міхельсоном. Алгоритми були реалізовані в середовищі MATLAB. Коefіцієнт  $k_{ij}$  був визначений за допомогою нейронної мережі та уточнений за експериментальними даними.

На рисунку 4 зображено графік залежності тисків, розрахованих за рівнянням Пенга-Робінсона від мольної концентрації суміші R717/R152a.

При обробці експериментальних даних за допомогою рівняння Пенга-Робінсона відхилення отриманих результатів від експериментальних даних не

перевищили 1 %, отже, даний метод розрахунку термодинамічних властивостей досліджуваної суміші володіє найвищою точністю із усіх запропонованих.

За допомогою програмного комплексу SigmaPlot були побудовані діаграми тиск-ентальпія для суміші R717/R152a азеотропного складу, а саме: R717/R152a (50/50), кг/кг (рисунок 5) та R717/R152a (80/20), моль/моль.

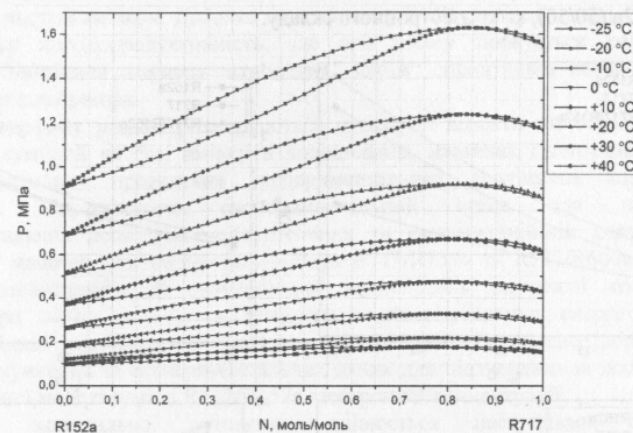


Рисунок 4 – Графік залежності тисків, розрахованих за допомогою рівняння Пенга-Робінсона від мольної концентрації суміші R717/R152a

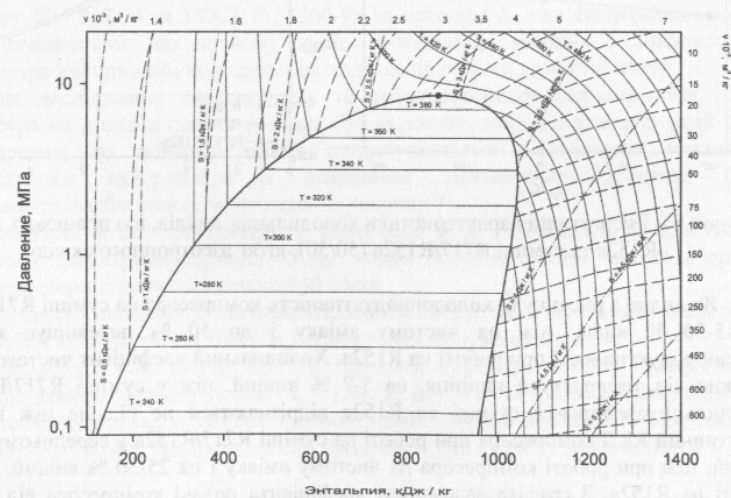


Рисунок 5 – Діаграма тиск-ентальпія для суміші азеотропного складу R717/R152a (50/50), кг/кг

При виконанні розрахунків були розроблені програмні модулі, що дозволяють розрахувати термодинамічні властивості дослідженої суміші та енергетичну ефективність циклів холодильних машин в широкій області концентрацій суміші R717/R152a.

У роботі був зроблений розрахунок енергетичних характеристик циклів холодильних машин, що працюють на холодоагентах R717, R152a та суміші R717/R152a (50/50), кг/кг азеотропного складу.

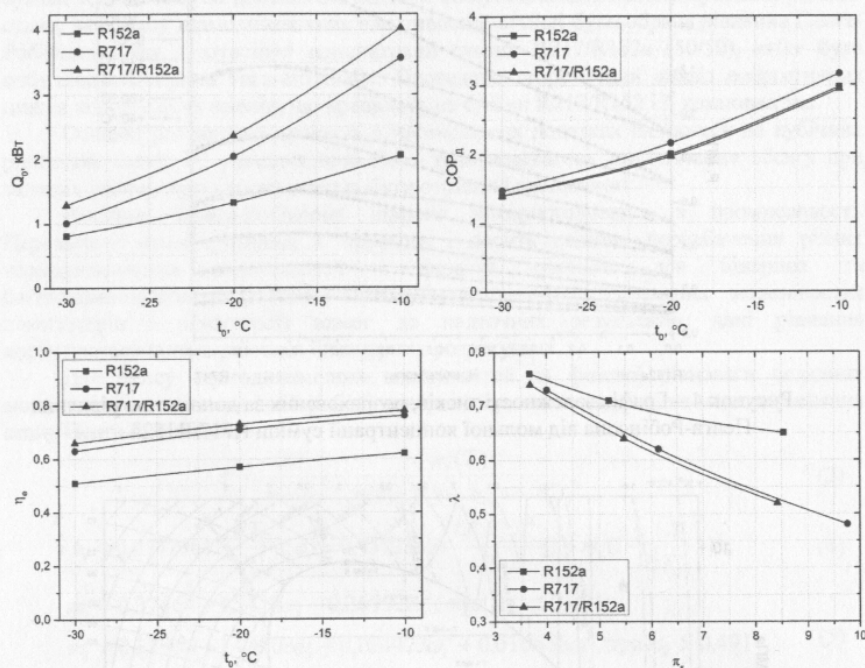


Рисунок 6 – Енергетичні характеристики холодильних циклів, що працюють на R717 і R152a та суміші R717/R152a (50/50), кг/кг азеотропного складу

Як видно з рисунку 6, холодопродуктивність компресора на суміші R717/R152a на 15-30 % вища, ніж на чистому аміаку і до 50 % перевищує значення холодопродуктивності при роботі на R152a. Холодильний коефіцієнт чистого аміаку, залежно від температури кипіння, на 5-7 % вищий, ніж у суміші R717/R152a, а холодильні коефіцієнти суміші та R152a відрізняються не більше ніж на 1 %. Ефективний ККД компресора при роботі на суміші R717/R152a в середньому на 5 % вищий, ніж при роботі компресора на чистому аміаку і на 25-30 % вищий, ніж при роботі на R152a. З графіка залежності коефіцієнта подачі компресора від ступеня стиснення можна побачити, що при низьких температурах кипіння коефіцієнт подачі

компресора на суміші R717/R152a вище на 7 %, а ступінь стиснення на 14 % нижча, ніж при роботі на чистому аміаку. При більш високих температурах кипіння різниця між коефіцієнтом подачі і ступенем стиснення всіх трьох холодоагентів не перевищує 2-5 % (при  $t_0 = -10$  °C).

Проаналізувавши графіки, що зображені на рисунку 6, можна зробити висновок, що суміш R717/R152a азеотропного складу має свої переваги та недоліки в порівнянні з чистим аміаком. Додавка холодоагенту R152a в аміак дозволяє одержати більш високу холодопродуктивність, але при цьому знижується холодильний коефіцієнт. Зниження ступеня стиснення також сприятливо позначиться на довговічності компресора.

У четвертому розділі розглядаються практичні аспекти застосування нових композицій сумішей на базі аміаку в холодильних машинах і теплових насосах. Наведено методику проведення експериментальних досліджень холодильних компресорів. Спроектовано експериментальний стенд для проведення експериментальних досліджень енергетичних та експлуатаційних характеристик холодильної машини при роботі на сумішах R717/R152a та R717/R600a у всьому діапазоні концентрацій. За результатами випробувань визначені концентрації сумішей, при яких досягається оптимальне співвідношення енергетичних та експлуатаційних характеристик холодильної машини. Проведено порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних для підтвердження достовірності запропонованої моделі суміші R717/R152a азеотропної концентрації.

Якість холодильної установки оцінюється наступними основними показниками: холодопродуктивністю холодильного компресора  $Q_0$  (кВт), споживаною потужністю  $N_e$  (кВт), холодильним коефіцієнтом  $COP = Q_0/N_e$ . У нашому випадку випробування холодильної машини проводилися відповідно до стандарту ISO 917-74 та ГОСТ Р 51360-99 за методом А – на експериментальному стенді, працюючому по повному циклу холодильної машини з використанням калориметра з вторинним холодильним агентом на стороні всмоктування.

Для дослідження енергетичних та експлуатаційних характеристик роботи компресора на досліджуваних сумішах був спроектований калориметричний стенд, який працює по повному циклу одноступінчастої холодильної машини, з використанням калориметра з вторинним холодильним агентом. Схема експериментального стенду зображена на рисунку 7.

Головний об'єкт дослідження – компресор Вокс F2-NH<sub>3</sub>, що складається з 2 циліндрів, з діаметрами поршнів 45 мм, ходом поршнів 38 мм, частота обертання вала компресора становить близько 940 об/хв.

На спроектованому експериментальному стенді були проведені дослідження сумішей R717/R152a та R717/R600a у всьому діапазоні концентрацій.

При дослідженні суміші R717/R152a маса заправки системи аміаком складала 0,9 кг при температурному режимі  $t_k = +30$  °C,  $t_0 = -10$  °C. Експеримент проводився на чистих компонентах і сумішах з різною масовою концентрацією R152a, таких як: 10, 30, 50, 70, 90 мас. %. Дослідження проходило при температурах кипіння  $t_0 = -10$ ;  $-20$ ;  $-30$  °C.

При дослідженні суміші R717/R600a маса заправки системи аміаком складала 0,84 кг при температурному режимі  $t_k = +30$  °C,  $t_0 = -10$  °C. Експеримент проводився

на чистих компонентах і сумішах з різною масовою концентрацією R600a, таких як: 10, 30, 50, 70, 90 мас. %. Дослідження проходило при температурах кипіння  $t_0 = -10$ ;  $-20$ ;  $-30$  °C.

Експеримент проводився при постійній температурі конденсації  $t_k = +30$  °C. Перегрів агента на всмоктуванні в компресор становив 10 °C. Переохолодження на виході з конденсатора складало 2,5 °C.

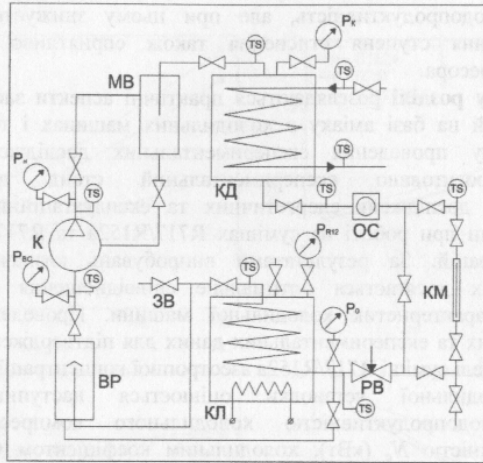


Рисунок 7 – Схема експериментального стенту:

К - компресор, МВ - маслявіддільник, КД - конденсатор, ОС - оглядове скло, КМ - прилад для відбору проб РХМ, РВ - регулюючий клапан, КЛ - електрокалориметр, ВР - віддільник рідини, ЗВ - запорний клапан, ТС - термометри.

Аналіз експериментальних даних (рисунок 8) показав, що додавання холодоагентів R152a і R600a до аміаку призводить до зростання холодопродуктивності і споживаної потужності та зниження холодильного коефіцієнту.

Так, найбільше зростання холодопродуктивності для суміші R717/R152a спостерігається при азеотропній концентрації. При цьому, порівняно з чистим аміаком, холодопродуктивність зростає на 9,5-12 %, споживана електрична потужність електродвигуна зростає на 11-14 %, а холодильний коефіцієнт знижується на 2,3-2,9 % в залежності від температури кипіння.

При порівнянні енергетичних характеристик суміші R717/R600a з чистим аміаком максимальне зростання холодопродуктивності суміші R717/R600a, досягається при концентрації ізобутану в суміші 45-50 мас. % і становить 12-14 %, зростання споживаної електричної потужності електродвигуна становить 14-17 %, а зниження холодильного коефіцієнта – 2,2-4,3 %, залежно від температури кипіння.

Під час проведення експерименту були проведені вимірювання робочих температур компресора, а саме, температури нагнітання, температури клапанної кришки та температури мастила в компресорі (рисунок 9).

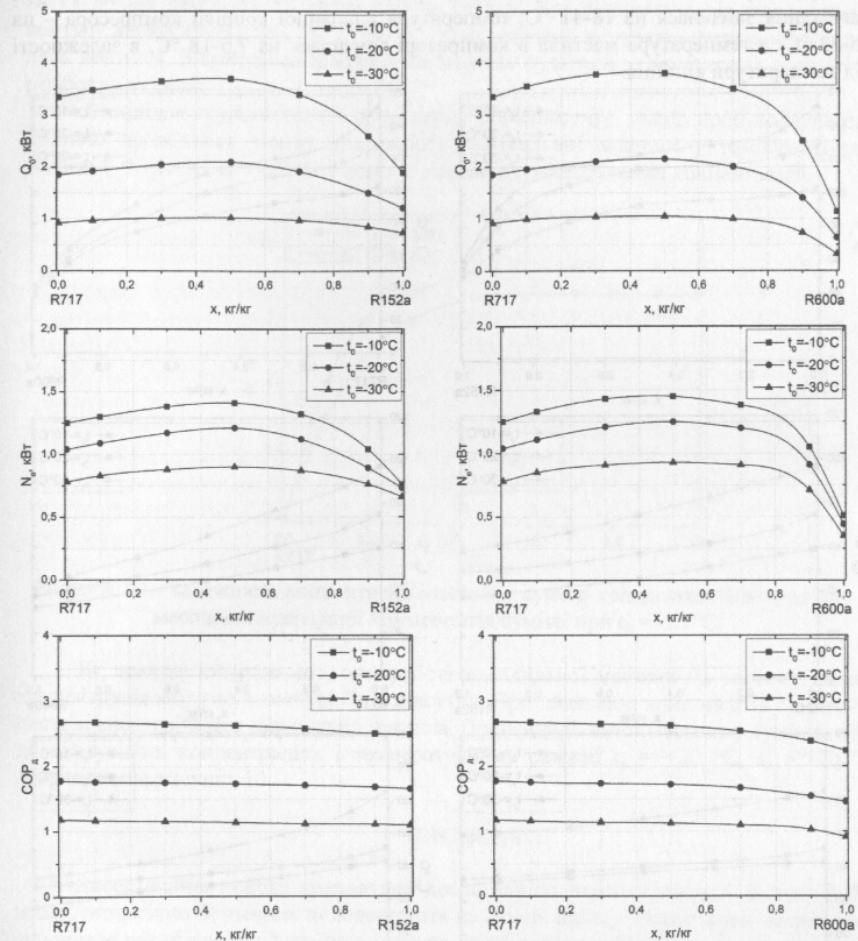


Рисунок 8 – Енергетичні характеристики роботи компресора на сумішах R717/R152a та R717/R600a

Як показали отримані результати, при додаванні в аміак холодоагентів R152a та R600a термонапруженість компресора стрімко знижується.

Для суміші R717/R152a при азеотропній концентрації температура нагнітання знизилася на 10-29 °С, температура клапанної кришки – на 13-22 °С, а температура мастила в компресорі – на 3-8 °С, в залежності від температури кипіння.

Для суміші R717/R600a при концентрації ізобутану 50 мас. % температура нагнітання знизилася на 18-41 °С, температура клапанної кришки компресора – на 15-32 °С, а температура мастила в компресорі знизилася на 7,5-18 °С, в залежності від температури кипіння.

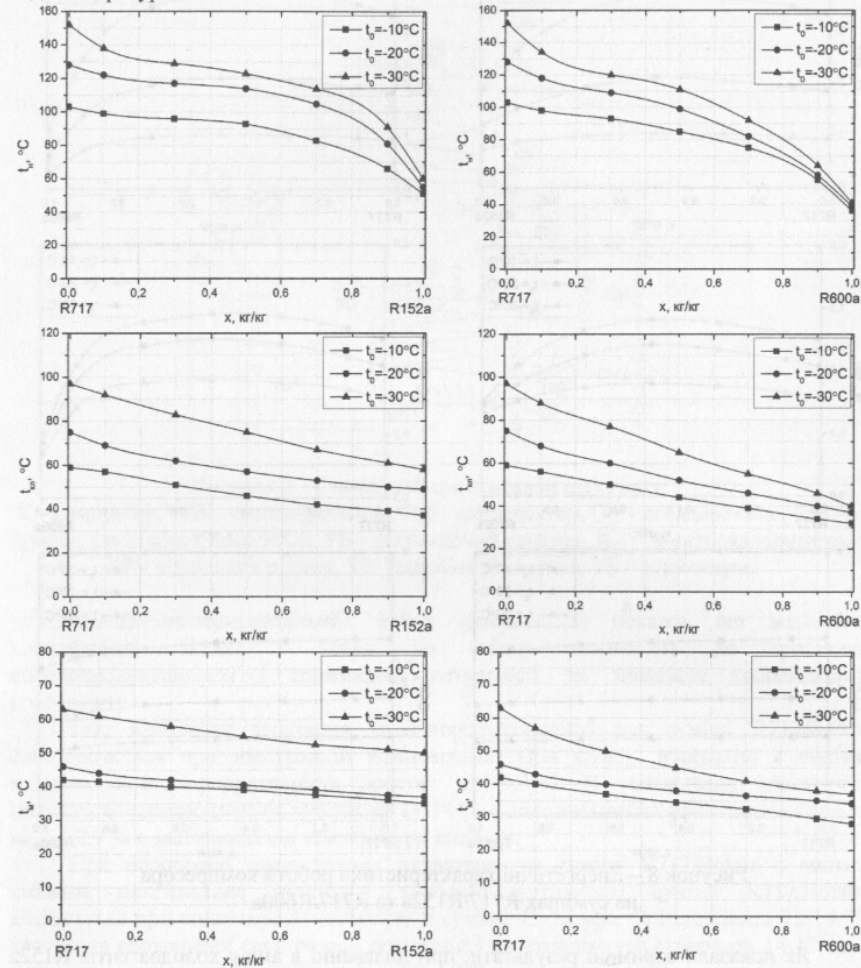


Рисунок 9 – Термонапруженість компресора при роботі на сумішах R717/R152a та R717/R600a

При проведенні експерименту були виконані вимірювання концентрації мастила ХА-30 в робочій речовині. Пристрій для відбору проб суміші холодоагент-мастило знаходився в контурі холодильної машини між конденсатором і регулюючим вентиляем та являв собою трубку, яка відсікалася від холодильного контуру двома вентилями. Пристрій було виготовлено з трубки з нержавіючої сталі і двох вентилів. З контуром холодильної машини пристрій з'єднувався за допомогою різьбових з'єднань.

Внаслідок трудомісткості проведення експерименту, відбір проб холодоагент-мастило проводився тільки при роботі холодильної машини у температурному режимі  $t_k = +30$  °С,  $t_0 = -20$  °С у всьому діапазоні досліджуваних концентрацій.

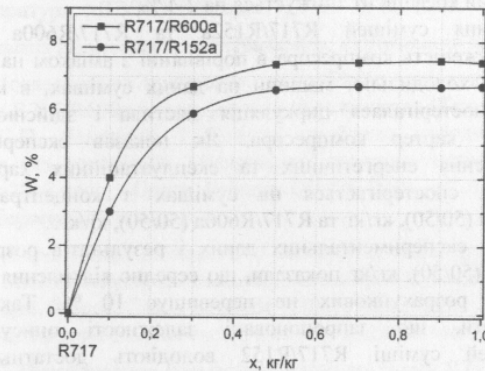


Рисунок 10 – Залежність концентрації мастила в суміші холодоагент-мастило від масової концентрації компонентів суміші при  $t_0 = -20$  °С.

Як показав експеримент, при роботі холодильної машини на чистому аміаку концентрація мастила в контурі була відсутня. При додаванні компонентів сумішей в системі спостерігалася циркуляція мастила. Процентний вміст мастила в сумішах при досліджуваних концентраціях і температурному режимі  $t_k = +30$  °С,  $t_0 = -20$  °С зображено на рисунку 10.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена дослідженню перспективності застосування нових екологічно безпечних холодоагентів на основі аміаку. Проведення досліджень зумовлене ратифікацією Україною угод по запобіганню руйнування стратосферного озонного шару і зменшення емісії парникових газів.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження довели можливість використання в малих холодильних машинах сумішей на основі аміаку для поліпшення їх енергетичних і експлуатаційних характеристик.

На основі проведених досліджень сформульовані наступні головні висновки:

1. Експериментальні дослідження показали, що суміш R717/R152a в діапазоні температур (-75) - (+40) °С характеризується повною взаємною розчинністю компонентів. При обробці експериментальних даних по фазовим рівновагам було встановлено, що при концентрації компонентів R717/R152a (50/50), кг/кг суміш характеризується явищем азеотропії.
2. Однорідна модель двокомпонентної системи Пенга-Робінсона дозволила описати термодинамічні властивості суміші R717/R152a з високою точністю та побудувати діаграму тиск-ентальпія для оцінки термодинамічної ефективності циклів малих аміачних холодильних машин.
3. Додавання до аміаку холодоагентів R152a та R600a до 50 мас. % призводять до зростання холодопродуктивності холодильної машини на 9,5-14 %. При цьому холодильний коефіцієнт знижується на 2-4 %.
4. Використання сумішей R717/R152a та R717/R600a дозволяє знизити термонапруженість компресора в порівнянні з аміаком на 3-41 °С. Крім того, при роботі холодильної машини на даних сумішах, в контурі холодильної машини спостерігалася циркуляція мастила і здійснювалося повернення мастила у картер компресора. Як показав експеримент, оптимальне співвідношення енергетичних та експлуатаційних характеристик роботи компресора спостерігається на сумішах з концентраціями компонентів R717/R152a (50/50), кг/кг та R717/R600a (50/50), кг/кг.
5. Порівняння експериментальних даних і результатів розрахунку для суміші R717/R152 (50/50), кг/кг показали, що середнє відхилення експериментальних даних від розрахункових не перевищує 10 %. Таким чином, можна стверджувати, що запропоновані залежності опису термодинамічних властивостей суміші R717/R152 володіють достатньою точністю для застосування в інженерних розрахунках.

### ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ

1. Хмельнюк М.Г. Тепловой насос как альтернативная теплоэнергетика [Текст] / М.Г. Хмельнюк, С.П. Ясинский // Збірник тез доповідей 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології». – Одеса: Видавництво. ОДАХ. 2009. – С. 27-28.

*Особистий внесок: аналіз літературних джерел, формування висновків.*

2. Хмельнюк М.Г. Анализ возможности внедрения современных теплонасосных установок в Украине [Текст] / М.Г. Хмельнюк, С.П. Ясинский // Тематичний збірник наукових праць «Обладнання та технології харчових виробництв»: Донецьк. ДонНУЕТ, 2010. – Вип.24. – С.122 – 128.

*Особистий внесок: постановка завдання, формування висновків.*

3. Теплонасосные установки – энергосберегающие технологии современности [Текст] / М.Г. Хмельнюк, С.П. Ясинский, А.Н. Дребот, А.В. Остапенко // Материали МНК «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв, вид. НУК, -2010.– С.240-241.

*Особистий внесок: постановка завдання, формування висновків.*

4. Хмельнюк М.Г. Проблемы и способы внедрения тепловых насосов [Текст] / М.Г. Хмельнюк, С.П. Ясинский, В.Н. Галкин // Сборник тезисов докладов международной конференции «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур». МГУИЭ, Москва. – 2010. – С.86-89.

*Особистий внесок: аналіз літературних джерел, формування висновків.*

5. Хмельнюк М.Г. Результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик холодильной машины, работающей на смесях на базе аммиака [Текст] / М.Г. Хмельнюк, С.П. Ясинский, Е.Н. Корба // Сборник тезисов докладов международной конференции «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур». МГУИЭ, Москва. – 2010. – С.220-223.

*Особистий внесок: аналіз результатів експерименту, формування висновків.*

6. Дребот А.Н. Исследование процессов теплообмена при конденсации смесей аммиака и изобутана R717/R600a в межтрубном пространстве [Текст] / А.Н. Дребот, В.П. Чепурненко, С.П. Ясинский // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології / Збірник тез доповідей/ Міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 14-16 вересня 2011 року, - Одеса, Видавн. ОДАХ. 2011. – С. 166.

*Особистий внесок: формування висновків.*

7. Khmelnyuk M. Experimental researches of compressor working on mixtures based on ammonia [Text] / M. Khmelnyuk, S. Yasinskiy, E. Korba // The 23<sup>rd</sup> IIR International Congress of Refrigeration. Prague, Czech Republic – 2011. Papers 335.

*Особистий внесок: аналіз результатів експерименту, формування висновків.*

8. Хмельнюк М.Г. Исследование фазового равновесия смеси R717/R152a [Текст] / М.Г. Хмельнюк, С.В. Артеменко, С.П. Ясинский // Холодильна техніка і технологія. – 2012. №3 (137). - С.29-33.

*Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, формування висновків.*

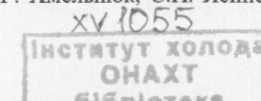
9. Хмельнюк М.Г. Исследование аммиачного компрессора ВОСК F2 NH3 на смеси R717/R152a [Текст] / М.Г. Хмельнюк, С.П. Ясинский // VI Всеукраїнська науково-технічна конференція «Удосконалення малої холодоплотехніки – використання холоду в харчовій галузі», Донецьк, 19-21 вересня 2012р. – С. 10.

*Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, аналіз результатів, формування висновків.*

10. Хмельнюк М.Г. Экспериментальные исследования компрессора ВОСК F2 NH3 на смеси R717/R152a [Текст] / М.Г. Хмельнюк, С.П. Ясинский, А.Г. Федоров // Холодильна техніка і технологія. – 2012. №4 (138). - С.42-46.

*Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, виконання розрахунків, формування висновків.*

11. Хмельнюк М.Г. Смесь R717/R152a – новое рабочее тело аммиачных холодильных машин [Текст] / М.Г. Хмельнюк, С.П. Ясинский // Третя міжнародна



науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв, вид. НУК, -2012.– С.357-358.

*Особистий внесок: формування висновків.*

12. Хмельнюк М.Г. Применение смеси R717/R152a для повышения энергетической эффективности аммиачных холодильных машин [Текст] / М.Г. Хмельнюк, С.П. Ясинский // Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 90-річчю Одеської державної академії холоду, Одеса, 8-10 жовтня 2012р. – С. 283-288. (Додаток до науково-технічного журналу Холодильна техніка і технологія (вип. 4 (138), 2012)).

*Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, формування висновків.*

13. Хмельнюк М.Г. Природные рабочие тела холодильных машин: тенденции и современность [Текст] / М.Г.Хмельнюк, С.П. Ясинский // Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства» - Львів: ЛДУ БЖД, 2012. – 385 с. с 272-274.

*Особистий внесок: формування висновків.*

14. Хмельнюк М.Г. Экспериментальные исследования компрессора на новых смесях на основе аммиака [Текст] / М.Г. Хмельнюк, С.П. Ясинский, А.Г. Федоров // Тематичний збірник наукових праць «обладнання та технології харчових виробництв»: Донецьк. ДонНУЕТ, 2012. – Вип.30. с. 212-218.

*Особистий внесок: виконання розрахунків, формування висновків.*

15. Ясинский С.П. Улучшение эксплуатационных характеристик холодильных машин при работе на смесях на базе аммиака [Электронный ресурс] / С.П. Ясинский, М.Г. Хмельнюк // Электронное издание «Вестник Национального университета кораблестроения». - Николаев: НУК, 2012. - №2. - Режим доступа: <http://ev.nuos.edu.ua/ua/issue?issueId=17919>.

*Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, виконання розрахунків, формування висновків.*

#### АННОТАЦИЯ

Ясинский С.П. Бинарные хладагенты на основе аммиака – рабочие вещества малых холодильных машин. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. – Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, 2013 г.

Данная работа посвящена разработке и исследованию рабочих веществ на основе смесей аммиака, позволяющих улучшить энергетические и эксплуатационные характеристики малых аммиачных холодильных машин.

В работе представлены результаты исследований перспектив применения бинарных смесей на основе аммиака в качестве рабочих веществ малых холодильных машин.

Автором проведены экспериментальные исследования взаимной растворимости и фазовых равновесий смеси R717/R152a. В результате обработки экспериментальных данных было установлено, что исследуемая смесь обладает полной взаимной растворимостью компонентов в диапазоне температур (-75) - (+40) °С. Для смеси R717/R152a впервые были получены данные по фазовым равновесиям в температурном диапазоне (-25)-(+40) °С, исходя из которых очевидно, что смесь обладает явлением азеотропии при концентрации R717/R152a (50/50), кг/кг.

Было выполнено описание термодинамических свойств исследуемой смеси с помощью уравнения состояния Пенга-Робинсона. Полученные результаты позволили построить диаграммы давление-энтальпия для массовой и мольной концентраций смеси R717/R152a азеотропного состава.

На спроектированном экспериментальном стенде для испытания холодильных компрессоров были проведены исследования энергетических и эксплуатационных характеристик работы компрессора на смесях R717/R152a и R717/R600a во всем диапазоне концентраций. Как показали экспериментальные исследования, использование предложенных смесей позволяет повысить холодопроизводительность холодильной установки и снизить термонапряженность компрессора. Кроме того, при использовании предложенных смесей, в контуре холодильной машины наблюдалась циркуляция масла и возврат его в картер компрессора, что дает возможность отказаться от использования маслоотделителя.

Для оценки достоверности полученных данных в работе был проведен анализ теоретических расчетов и экспериментальных данных и сделано заключение, что полученная модель термодинамических свойств смеси R717/R152a (50/50), кг/кг является достоверной и может быть рекомендована для использования, в том числе и в инженерных расчетах.

**Ключевые слова:** холодильные машины, смеси хладагентов, дифторэтан, изобутан, модель термодинамических свойств, фазовые равновесия.

#### АНОТАЦІЯ

Ясинський С.П. Бінарні холодоагенти на основі аміаку – робочі речовини малих холодильних машин. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 - Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. - Інститут холоду, криотехнологій і екоенергетики ім. В.С. Мартиновського Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, 2013 р.

В результаті проведених експериментальних досліджень суміші R717/R152a було встановлено, що досліджувана суміш володіє повною взаємною розчинністю в діапазоні температур (-75) - (+40) °С і отриманий масив даних по фазовій рівновазі в температурному діапазоні (-25) - (+40) °С у всьому діапазоні концентрацій. За

допомогою рівняння Пенга-Робінсона були описані термодинамічні властивості досліджуваної суміші і побудовані діаграми стану тиск-ентальпія.

На спроектованому експериментальному стенді були проведені дослідження енергетичних і експлуатаційних характеристик роботи компресора на сумішах R717/R152a і R717/R600a у всьому діапазоні концентрацій, в результаті яких було встановлено, що використання запропонованих сумішей дозволяє підвищити холодопродуктивність холодильної установки і знизити термонапруженість компресора. Крім того, при використанні запропонованих сумішей можна заощадити на капітальних витратах при проектуванні холодильної установки.

**Ключові слова:** *холодильні машини, суміші холодоагентів, діфторетан, ізобутан, модель термодинамічних властивостей, фазові рівноваги.*

### SUMMARY

Sergey Yasinskiy. Binary Refrigerants based on Ammonia – working medium for Small Refrigerating Machines. – Manuscript.

Thesis for candidate degree of technical science according major 05.05.14 – “Refrigeration, vacuume and compressor engineering, air-cooling system”, Odessa, 2013.

The thesis is about solving following scientific problem pointed at developing and research of working medium for Refrigerating Machines in terms of Ammonia Blends which are let to improve energy and operation characteristics for small refrigeration machines.

Experimental stand for R717/R152a refrigerants research is engineered. It is defined the examining blend possess complete mutual dissolubility in the (-75) - (+40) °C temperature range. The data array for phase equilibrium temperature in the range (-25) - (+40) °C for whole range of concentration is defined. Using Peng-Robinson equation of state the termodinamical properties for examining blend are generated and Pressure-Enthalpy state diagram is proposed.

Energy and operation characteristics compressor performance research working on R717/R152a and R717/R600a blends in the whole range of concentration is conducted. As a result we are specified the proposed blends use let us to raise refrigeration capacity for refrigeration unit and to reduce compressor thermotension.

This thesis demonstrates usage of R717/R152a and R717/R600a refrigerant blends lead to reducing capital costs during refrigerant unit engineering.

**Key words:** *Refrigerating Machines, Refrigerant Blends, Difluorineethane, Isobutane, Thermodynamic Properties Model, Phase Equilibrium.*