

Автореферат Н
Н70

Одеська державна академія холоду

Ніченко Сергій Володимирович

УДК 621.564.25:551.510.534

**ВПЛИВ КОМПРЕСОРНИХ МАСТИЛ НА ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
РОБОЧИХ ТІЛ ХОЛОДИЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ**

**Спеціальність 05.14.06 - Технічна теплофізика та
промислова теплоенергетика**

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса - 2008



Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор кафедри інженерної теплофізики Одеської державної академії холоду Железний Віталій Петрович

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор Одеської державної академії холоду Мазур Віктор Олександрович.

кандидат технічних наук, доцент Харківського національного аерокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського "ХАИ" Петухов Ілля Іванович

Захист дисертації відбудеться "10" листопада 2008 р. у 14⁰⁰ годин в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.41.087.01 в Одеській державній академії холоду за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

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

"9" 10 2008 року.

Мілованов В.І.

1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

xv 1173
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

Актуальність теми. Перехід на озононеруйнівні природні холодоагенти вимагає розробки нових компресорних мастил, що забезпечують оптимальні умови експлуатації нового покоління холодильного устаткування. Наявність домішок мастила в холодоагенті впливає на його термодинамічні властивості. Тому енергетична ефективність холодильного циклу, інтенсивність теплообміну у випарнику й конденсаторі будуть залежати не тільки від застосованого холодоагенту, але й від оптимального вибору компресорного мастила.

У цей час експериментальні дослідження залишаються практично єдиним джерелом одержання достовірної інформації про властивості розчинів холодоагент/мастило (РХМ), які повинні розглядатися як реальні робочі тіла (РРТ) для холодильного устаткування. Використання існуючих теоретичних моделей стосовно до РХМ зводиться, в основному, до апроксимації експериментальних даних про фазові рівноваги рідина-пар. Крім того, для досягнення прийнятного ступеня адекватності ці моделі вимагають значного обсягу експериментальних даних.

З аналізу опублікованої в пресі інформації про властивості РХМ випливає, що більшість робіт присвячена дослідженню фазових рівноваг і в'язкості. Разом з тим, дані з густини, капілярної сталості, поверхневого натягу й калоричних властивостей РХМ у літературі практично відсутні. Дотепер залишаються недостатньо вивченими питання зміни концентрації домішок мастила в холодоагенті у випарнику й методи оцінки впливу домішок мастила на параметри ефективності термодинамічного циклу, що затрудняє розробку технічних рішень, спрямованих на підвищення енергетичної ефективності сучасного покоління побутових холодильників.

Серед вчених, які плідно працювали в рамках даних наукових напрямків, і на публікації яких автор опирався при вирішенні розглянутих у дисертації завдань, варто назвати такі імена як: Бадильєс І.С., Вамлінг Л. (Vamling L.), Ватанабе К. (Watanabe K.), Геллер В.З., Юбі-Ідрісі М. (Youbi-Idrissi M.), Барбоса Дж.Р. (Barbosa J. R.), Спашус Х.О. (Spauschus H. O.), Кедзірський М.А. (Kedziarski M. A.), Йокозекі А. (Yokozeki A.), Крузе Х. (Kruse H.), Лавренченко Г.К., Мазур В.О., Мельцер Л.З., Філіппов Л.П. та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційна робота виконана відповідно до: Постанови Верховної Ради України від 04.02.2004 р. про ратифікацію Кіотського протоколу, що набув чинності 16.02.2005; Постанови Кабінету Міністрів України №624 від 16.05.2002 р. «Про посилення державного регулювання ввозу і вивозу з України озоноруйнівних речовин»; Постанови Кабінету Міністрів України №256 від 04.03.2004 р., що затвердила програму призупинення виробництва і використання озоноруйнівних речовин на 2004-2030 рр. Дисертаційна робота також є складовою частиною досліджень, проведених у рамках виконання: проекту № 10.02/003 Т05К-001 Державного фонду фундаментальних досліджень Міністерства освіти і науки України й Білоруського республіканського фонду фундаментальних досліджень, затвердженого наказом Міністерства освіти і науки України № 356 від 14.06.2005 р. (науково-технічна робота № Ф10/ 34-2005, номер держреєстрації – 0105U007471) і науково-дослідної роботи МК 06/7, номер держреєстрації – 0106U002619.

Метою і завданням дослідження є створення експериментально обґрунтованої бази довідкових даних з термодинамічних властивостей розчинів холодоагенту R-600a з компресорним мастилом

ОДЕСЬКА
ДЕРЖАВНА
АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ
БІБЛІОТЕКА

Reniso WF 15A, які широко застосовуються при виробництві побутової холодильної техніки; експериментальне дослідження калоричних властивостей розчину холодоагенту R-600a з компресорним маслом Reniso WF 15A; оцінка впливу домішок масил у різних холодоагентах на енергетичні показники компресорної системи.

Об'єктами дослідження є розчини озонобезпечного холодоагенту R-600a з компресорним маслом Reniso WF 15A.

Предметом дослідження є: термодинамічні властивості розчинів холодоагенту R-600a з компресорним маслом Reniso WF 15A; діаграми тиск-ентальпія й ентальпія-концентрація для PPT R-600a/Reniso WF 15A, R-600a/XMI Азмол, R-134a+R-152a/ХФ 22c16, R-134a/Castrol Icematic SW22, R-134a/Mobil EAL Arctic 22, R-245fa/Planetelf ACD 100FY; показники ефективності компресорної системи при використанні PPT R-600a/Reniso WF 15A, R-600a/XMI Азмол, R-134a+R-152a/ХФ 22c16, R-134a/Castrol Icematic SW22, R-134a/Mobil EAL Arctic 22, R-245fa/Planetelf ACD 100FY.

Для досягнення поставленої мети було необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати експериментально-розрахункове дослідження фазових рівноваг рідина-рідина, рідина-пара, густини й поверхневого натягу розчинів озононеруйнівного холодоагенту R-600a з маслом Reniso WF 15A;
- виконати експериментально-розрахункове дослідження калоричних властивостей розчинів озононеруйнівного холодоагенту R-600a з маслом Reniso WF 15A;
- розробити таблиці довідкових даних з термодинамічних властивостей розчинів R-600a з маслом Reniso WF 15A;
- розробити діаграми тиск-ентальпія й діаграми Меркеля для реальних робочих тіл R-600a/Reniso WF 15A, R-600a/XMI Азмол, R-134a+R-152a/ХФ 22c16, R-134a/Castrol Icematic SW22, R-134a/Mobil EAL Arctic 22, R-245fa/Planetelf ACD 100FY;
- зробити оцінку впливу домішок компресорного масла в PPT на показники енергетичної ефективності компресорної системи й розробити практичні рекомендації для забезпечення нормальної циркуляції домішок масла в холодоагенті по контуру холодильної установки.

Рішення сформульованих завдань досягнуто в рамках наступних **методів дослідження**:

експериментальних досліджень, включаючи:

- дослідження фазових рівноваг рідина-рідина й рідина-пара, густини, поверхневого натягу, ентальпії й теплоємності розчинів R-600a/Reniso WF 15A;
- теоретичних досліджень, включаючи:
- розрахунок псевдокритичних параметрів РХМ;
- розрахунок таблиць довідкових даних з термодинамічних властивостей для робочого тіла R-600a/Reniso WF 15A;
- розробку діаграм тиск-ентальпія й діаграм Меркеля для реальних робочих тіл R-600a/Reniso WF 15A, R-600a/XMI Азмол, R-134a+R-152a/ХФ 22c16, R-134a/Castrol Icematic SW22, R-134a/Mobil EAL Arctic 22, R-245fa/Planetelf ACD 100FY;
- оцінку показників ефективності компресорної системи з урахуванням впливу домішок масла в холодоагенті на термодинамічні властивості робочих тіл R-600a/Reniso WF 15A, R-600a/XMI Азмол, R-134a+R-152a/ХФ 22c16, R-134a/Castrol Icematic SW22, R-134a/Mobil EAL Arctic 22,

R-245fa/Planetelf ACD 100FY.

Методи дослідження. При вирішенні зазначених задач використовувались методи експериментального визначення тиску насиченої пари, густини, капілярної сталої, поверхневого натягу а також калоричних властивостей РХМ на лінії кипіння. При обробці отриманих експериментальних даних і розробці таблиць довідкових даних з властивостей PPT використовувались методи теорії термодинамічної подоби, адаптовані до розрахунку властивостей РХМ.

Наукова новизна виконаної роботи полягає в тому, що:

- уперше проведено експериментально-розрахункове дослідження фазових рівноваг рідина-рідина, рідина-пара, густини й поверхневого натягу, ентальпії й теплоємності розчинів R-600a/Reniso WF 15A;
- показано, що розрахунок надлишкової ентальпії по формулі Кірхгофа не узгоджується з результатами експериментального дослідження;
- уперше запропоновано при термодинамічному моделюванні тиску насиченої пари і густини РХМ використовувати різні значення псевдокритичної температури, які повинні належати до різних складів об'ємної рідкої фази й поверхневого шару;
- створено таблиці довідкових даних з термодинамічних (включаючи калоричні) властивостей розчинів R-600a у компресорному масилі Reniso WF 15A і на їхній основі розроблені діаграми тиск-ентальпія й діаграми Меркеля для реального робочого тіла R-600a/Reniso WF 15A;
- виконано узагальнення отриманих результатів дослідження впливу домішок масла у різних холодоагентах на показники енергетичної ефективності компресорної системи.

Обґрунтованість і достовірність отриманих наукових результатів підтверджується проведенням тарувальних експериментів, детальним аналізом похибок отриманих експериментальних даних, адекватним описом отриманих експериментальних даних і зіставленням розрахованих показників ефективності компресорної системи з результатами експлуатаційних випробувань холодильного устаткування, а також висновками, отриманими іншими авторами.

Наукове значення мають такі результати дослідження:

- експериментальні дані з тиску насиченої пари, густини, капілярної сталої, поверхневого натягу а також калоричних властивостей розчинів R-600a/Reniso WF 15A;
- методика визначення псевдокритичної температури РХМ окремо для опису поверхневих (тиск насиченої пари, поверхневий натяг) та об'ємних (густина, ентальпія) властивостей;
- експериментальне дослідження калоричних властивостей РХМ;
- експериментальне визначення надлишкової ентальпії (ентальпії змішування);
- розробка діаграм тиск-ентальпія та ентальпія-концентрація для різних реальних робочих тіл, якими є розчини холодоагент/масило;
- методика оцінки впливу домішок компресорних масил на енергетичну ефективність компресорної системи;

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що отримано великий обсяг даних з термодинамічних властивостей розчинів R-600a/Reniso WF 15A, побудовані діаграми тиск-ентальпія й діаграми Меркеля для різних реальних робочих тіл (R-600a/Reniso WF 15A, R-600a/XMI Азмол, R-134a+R-152a/ХФ 22c16, R-134a/Castrol Icematic SW22, R-134a/Mobil EAL Arctic 22,

R-245fa/Planetel ACD 100FY), необхідні при проектуванні й проведенні експлуатаційних досліджень нового покоління холодильної техніки.

Отримані дані про термодинамічні властивості робочого тіла R-600a/Reniso WF 15A і результати дослідження впливу домішок мастила на показники енергетичної ефективності компресорної системи підготовлені для передачі для затвердження у якості рекомендованих довідкових даних у державне підприємство «Термодинамічний центр» Мінпаливенерго України (м.Київ), а також на АТ «НОРД» (м.Донецьк), ЗАТ «Атлант» (м.Мінськ) і ВАТ «РЕФМА» (м.Мелітополь) для практичного впровадження.

Особистий внесок здобувача. Дисертація виконана при консультаціях наукового керівника. На окремих етапах виконання досліджень у ній брали участь співробітники лабораторії кафедри інженерної теплофізики ОДАХ - співавтори публікацій. Особисто здобувачем розроблена й створена експериментальна установка по вивченню калоричних властивостей речовин, крім того, він брав участь у створенні установки по дослідженню розчинності газів у рідинах. Дисертантом виконаний основний обсяг експериментальних досліджень фазових рівноваг, густини, поверхневого натягу й ентальпії розчинів R-600a/Reniso WF 15A, на підставі яких розраховані таблиці довідкових даних. Особисто дисертантом побудовані діаграми тиск-ентальпії й діаграми Меркеля для різних PPT і проведена теоретична оцінка впливу домішок мастила на енергетичну ефективність компресорної системи.

Апробація роботи. Основні результати виконаних досліджень доповідалися автором на Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки й технології», м. Одеса, 2005; Міжнародній науково-технічній конференції «Промисловий холод і аміако», м. Одеса, 2006; Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки й технології», м. Одеса, 2007; 4-й міжнародній конференції «Фізика рідкого стану: сучасні проблеми», м. Київ, 2008; Крім того, наукові результати, викладені в дисертації, представлялися співавторами робіт на XI Російській конференції з теплофізичних властивостей речовин, м. Санкт-Петербург (Росія, 2005); 6-й Міжнародній конференції по компресорах і холодоагентах «Компресори-2006», м. Палернчика (Словаччина, 2006); 5-й міжнародній конференції «Проблеми промислової теплотехніки», м. Київ, 2007.

Публікації. Основний зміст дисертації викладений в 9 статтях, опублікованих у професійних періодичних журналах, і 10 друкованих працях, опублікованих у формі доповідей і тез у збірниках наукових праць міжнародних конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури й двох додатків. Робота містить 218 сторінок тексту, включаючи 77 рисунків, 16 таблиць і 159 найменувань бібліографічних джерел.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, відображений її зв'язок з існуючими державними програмами й держбюджетною науковою тематикою ОДАХ, сформульована мета й визначені завдання дослідження, а також викладені основні наукові результати, зазначений особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи й публікації.

У першому розділі наведено огляд виконаних експериментальних і теоретичних робіт, присвячених дослідженням фазових рівноваг (рідина-рідина, рідина-пара), густини й калоричних властивос-

тей розчинів озононеруйнуючих холодоагентів з компресорними мастилами.

Проведений аналіз виконаних експериментальних досліджень термодинамічних властивостей РХМ дозволяє дійти висновку, що в літературі присутня досить обмежена інформація про термічні властивості для розчинів озононеруйнуючих холодоагентів з компресорними мастилами. Практично відсутні дані з густини, калоричних властивостей і поверхневого натягу РХМ. Інформація з термодинамічних властивостей розчинів досить перспективного для побутових холодильних приладів, систем кондиціонування й теплових насосів холодоагенту R-600a з комерційними мастилами відсутня.

На підставі проведеного аналізу визначені методи рішення поставлених у дисертації завдань, які спрямовані на вивчення термодинамічних властивостей розчинів R-600a/компресорне мастило Reniso WF 15A і подальший розвиток існуючих методів прогнозування термодинамічних властивостей настільки складних термодинамічних систем, до яких відносяться розчини холодоагентів з мастилами.

Другий розділ присвячений комплексному експериментальному дослідженню тиску насиченої пари, густини й капілярної сталої розчинів R-600a/компресорне мастило Reniso WF 15A з наступним розрахунковим вивченням закономірностей зміни зазначених властивостей.

Експериментальні дослідження фазових рівноваг, густини й капілярної сталої розчинів R-600a/компресорне мастило Reniso WF 15A були проведені на добре зарекомендованій експериментальній установці, призначеній для комплексного дослідження термодинамічних властивостей РХМ [1]. У даній установці реалізуються статичний метод виміру тиску насиченої пари, пікнометричний метод виміру густини рідини й модифікований диференціальний метод капілярного підняття для виміру поверхневого натягу.

Результати проведеного дослідження демонструють рис. 1-6. Виконаний аналіз показує, що повна відносна похибка виміру тиску насиченої пари перебуває в межах $\delta P_s = (0,3...2...2,7)\%$, густини $\delta \rho = (0,8...1...1,2)\%$, капілярної сталої $\delta \sigma = (0,8...3...3,62)\%$,

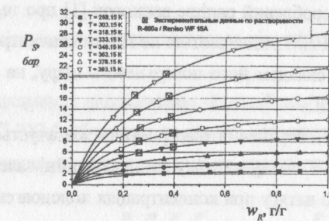


Рис. 1. Концентраційна залежність тиску насиченої пари РХМ R-600a/Reniso WF 15A

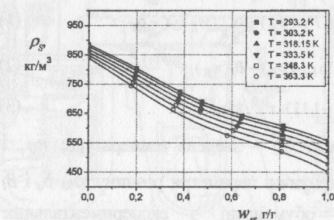


Рис. 2. Концентраційна залежність густини рідкої фази РХМ R-600a/Reniso WF 15A

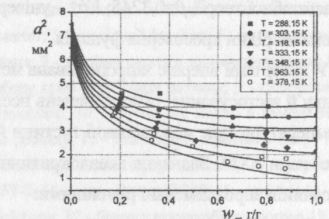


Рис. 3. Концентраційна залежність капілярної сталої РХМ R-600a/Reniso WF 15A

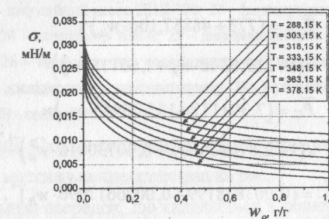


Рис. 4. Концентраційна залежність поверхневого натягу R-600a/Reniso WF 15A

поверхневого натягу $\delta\sigma = (0,9...4,9)\%$, концентрації $(0,01...0,15)\%$. Проведене дослідження підтверджує зроблений раніше висновок [1] про те, що тиск насиченої пари, капілярна стала й поверхневий натяг РХМ визначаються не тільки концентрацією холодоагенту в повному обсязі рідкої фази розчину, але й складом його поверхневого шару, на який істотно впливають процеси адсорбції на міжфазній границі.

Поверхневий шар розчину збагачується компонентом, додавання якого зменшує поверхневий натяг. У цьому випадку концентраційні залежності тиску насиченої пари, капілярної сталої й поверхневого натягу при концентраціях холодоагенту w_R $(0,6...1)$ повинні носити пологий характер (див. рисунки 1, 2 і 4).

Експериментальні дані з тиску насиченої пари і густини рідкої фази розчинів R-600a/Reiso WF 15A апроксимовані залежностями вигляду:

$$\ln P_S = \ln \bar{P}_C(w_R) - \alpha_R(w_R) \cdot \tau - b_d \cdot \tau^{2,64}; \quad (1)$$

$$\ln \rho_{l,S} = \ln \bar{\rho}_C(w_R) + B_l(w_R) \cdot \tau^{\beta F(\tau)}; \quad (2)$$

$$F(\tau) = 1 - 1,113 \cdot \tau^{0,4} / \ln \tau, \quad (3)$$

де $\tau = \ln(\bar{T}_C / T)$ – зведена температура; $\bar{P}_C$, $\bar{\rho}_C$ і $\bar{\rho}_C$ – псевдокритичні параметри розчину; α_R , b_d і B_l – коефіцієнти, обумовлені з експериментальних даних; β – показник ступеня, значення якого прийнято рівним величині, яка отримана для відповідного індексу в рамках масштабної теорії, $\beta = 0,3245$; $F(\tau)$ – універсальна для нормальних рідин кросверна функція.

У дисертації вперше запропонована методика розрахунку й застосування різних значень псевдокритичної температури при моделюванні густини й тиску насиченої пари РХМ. Значення псевдокритичних параметрів розчинів апроксимовані рівняннями:

$$\bar{T}_{C,L} = (773 - 717,492 \cdot n_R) \times \\ \times (1 - 0,396439 \cdot n_R - 0,4674478 \cdot n_R^2)^{-1}; \quad (4)$$

$$\bar{T}_{C,S} = (773 + 48857,106 \cdot w_R) \times \\ \times (1 + 119,0348 \cdot w_R + 1,66115 \cdot w_R^2)^{-1}; \quad (5)$$

$$\bar{P}_C = (7,391117 + 155,23445 \cdot w_R) \times \\ \times (1 + 2,870486 \cdot w_R + 0,60730016 \cdot w_R^2)^{-1}; \quad (6)$$

$$\bar{\rho}_C = (0,003838199 + 0,0006617096 \cdot w_R)^{-1}; \quad (7)$$

де $\bar{T}_{C,L}$ й $\bar{T}_{C,S}$ – значення псевдокритичних температур для густини й тиску насиченої пари; w_R – масова частка холодоагенту; n_R – мольна частка холодоагенту в розчині. Виконане ебуліометричним методом дослідження показує, що молекулярна маса компресорного мастила Reniso WF 15A дорівнює 319 г/моль.

Експериментальні дані з капілярної сталої й поверхневого натягу розчинів R-600a/Reiso WF 15A апроксимовані рівняннями поліноміального виду.

Відхилення отриманих експериментальних даних від значень, розрахованих за рівняннями (1) і (2), не перевищують відповідних оцінок похибок.

На рисунках 5 і 6 представлені концентраційні залежності надлишкових функцій для густини $\Delta\rho_s^{ex}$, капілярної сталої $\Delta\sigma^{ex}$ і поверхневого натягу $\Delta\sigma^{ex}$ РХМ, обчислені як різниці між значеннями термодинамічних властивостей реального розчину й значеннями, розрахованими по адитивності з використанням масових концентрацій компонентів.

З характеру зміни надлишкових функцій випливає, що холодоагент із мастилом утворюють суміші із сильно вираженою зотропною поведінкою. Тому зазначені термодинамічні властивості розчинів не можуть бути розраховані в рамках застосовуваних різними авторами адитивних моделей.

Третій розділ дисертації присвячений експериментально-розрахунковому дослідженню розчинності холодоагенту R-600a з компресорним мінеральним мастилом Reniso WF 15A. Метою проведеного дослідження є розробка експериментальної установки для вивчення селективної розчинності багатоконпонентних сумішевих холодоагентів у мастилах і проведення тарувальних експериментів для розчинів R-600a/Reiso WF 15A, які б підтверджували її працездатність.

У дисертації наведено опис експериментальної установки, що реалізує статичний метод дослідження розчинності холодоагенту в мастилі з відбором проби рідкої фази розчину. Описується методика проведення дослідження розчинності холодоагентів з компресорними мастилами. У розділі представлені результати експериментальних досліджень, проведена оцінка похибки обмірених величин. Схема експериментальної установки для дослідження розчинності холодоагентів з компресорними мастилами представлена на рис. 7.

Основним робочим вузлом установки є вимірвальний осередок, що складається з рівноважної камери змішання 2, «гарячих» запірних вентилів В1, В13 і мембранного нуля-індикатора 12 у системі виміру тиску насиченої пари досліджуваних розчинів. Рівноважна камера являє собою товстостінну циліндричну посудину, виготовлену зі сталі марки 1Х18Н10Т. У камеру змішання введений капіляр 8

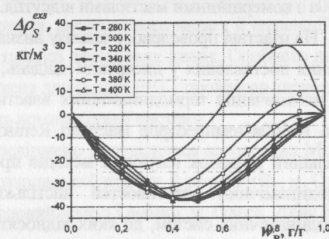


Рис. 5. Концентраційна залежність надлишкових функцій для густини рідкої фази РХМ R-600a/Reiso WF 15A

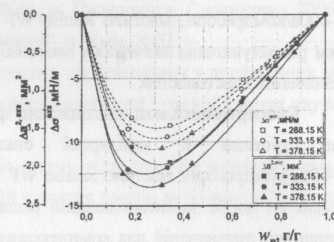


Рис. 6. Концентраційні залежності надлишкових функцій для поверхневого натягу й капілярної сталої РХМ R-600a/Reiso WF 15A

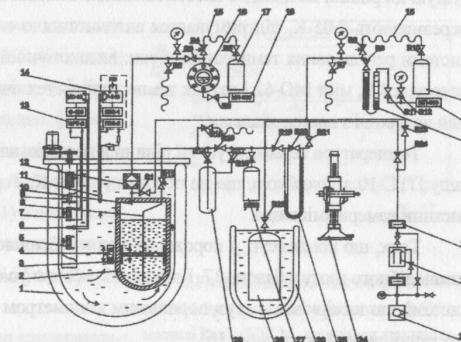


Рис. 7. Експериментальна установка для дослідження розчинності холодоагентів у компресорних мастилах:

1 - термостат; 2 - камера змішання; 3 - магнітна мішалка; 4 - постійний магніт; 5 - розгінний нагрівач; 6 - датчик системи терморегулювання; 7 - нагрівач системи терморегулювання; 8 - капіляр для відбору проб рідкої фази розчину; 9 - електромеханічна мішалка термостата; 10 - трубка для подачі в камеру змішання компонентів розчину; 11 - платиновий термометр опору ПТС-10; 12 - мембранний нуля-індикатор (роздільник); 13 - регулятор температури ВРТ-2; 14 - потенціометр Р-348; 15 - капіляр; 16 - газороздільний роздільник; 17 - балон з газоподібним азотом; 18 - грузопоршньовий манометр МП-600 або МП-60; 19 - запірний балончик; 20 - ртутний роздільник системи, що дожимає; 21 - вакуумна пастка; 22 - дифузійний насос ЦВЛ-100; 23 - форвакуумний насос ВН-461М; 24 - катетометр КМ-8; 25 - диференціальний ртутний манометр; 26 - термостат для волюмометричної посудини; 27 - балончик з досліджуваним холодоагентом; 28 - волюмометрична посудина; 29 - пастка; В1...В28 - вентилі.

із внутрішнім діаметром 0,5 мм, через який вироблялися відбори проб рідкої фази розчину, і трубка 10, через яку здійснювалися вакуумування вимірювального осередку й заправлення компонентами розчину. З метою виключення баластових об'ємів камери змішання, мембранний нуль-індикатор і вентилі В1, В13 розміщені всередині термостата 1.

У якості термостатуючої рідини використовувалася кремнійорганічна рідина ПМС-100. Всі деталі, що мають контакт у процесі експерименту з досліджуванним зразком, виготовлені зі сталі Х18Н10Т.

У термостаті також розміщені розгінний 5 і регулюючий 7 нагрівачі, встановлені в потоці термостатуючої рідини на виході з насоса-мішалки. Сталість температури в термостаті з коливаннями, що не перевищують 0,05 К, підтримувалася автоматичною системою регулювання. Основними елементами системи регулювання температури були: високоточний регулятор температури ВРТ-2 (регулятор температури 13), міст МО-62 і датчик температури - технічний платиновий термометр опору 6, встановлений на виході з насоса мішалки.

Температура термостатуючої рідини в досліді вимірювалася платиновим термометром опору 11 типу ПТС-10 з похибкою, що не перевищує 0,02 К. Термометр 11 встановлювався поблизу середньої частини камери змішання.

Тиск, що компенсує, у порожнині над мембраною нуль-індикатора підтримується за допомогою газоподібного азоту з балона 17. Капіляр 15 забезпечував плавне рівномірне регулювання тиску азоту в системі, що вимірювався грузопоршневым манометром 18 МП-60 чи МП-600 класу точності 0,05 (через газорідний роздільник 16).

Для вакуумування вимірювального осередку й очищення компонентів РХМ від газів, що не конденсуються, застосовувалася стандартна вакуумна система, що містила в собі форвакуумний насос 23 марки ВН-461М, дифузійний насос 22 ЦВЛ-100, азотні пастки 21. Система забезпечує підтримку вакууму порядку $(3...5) \cdot 10^{-1}$ Па.

Вимір маси розчиненого холодоагенту в пробі рідкої фази РХМ, відібраної з камери змішання, здійснювався у волюмометрі, що містить у собі наступні елементи: таровану ємність певного об'єму 28; лабіринтову пастку 29, призначену для запобігання можливого влучення мастила з узяті для аналізу проби РХМ у таровану ємність; ртутний диференціальний манометр 25. Конструкція диференціального манометра дозволяє переміщати у вертикальному напрямку обоє його коліна, завдяки чому внутрішній об'єм волюмометра підтримувався постійним. Проведені тарувальні експерименти показують, що відносна похибка виміру тиску у волюмометрі не перевищувала 0,05%. Спостереження за рівнем ртуті в трубках манометра здійснювалося за допомогою катетометра 24 КМ-8 з похибкою не більше 0,015 мм.

У процесі відбору проби рідкої фази РХМ волюметрична ємність підтримується при постійній температурі в термостаті 26. Маса пастки до й після узяття проби визначалася шляхом зважування на лабораторних аналітичних вагах АДВ-200М з похибкою, що не перевищує $5 \cdot 10^{-7}$ кг.

Для одержання відтворених результатів дослідження розчинності холодоагенту в мастилі й виключення грубих методичних похибок передбачається ретельне очищення компонентів досліджуваних сумішей. Видалення з мастила домішок води й газів, що не конденсуються, здійснюється при багаторазовій кристалізації й наступним вакуумуванням протягом 1 хвилини. Процедура очищення мастила від супутніх домішок повторюється кілька разів. Ступінь чистоти контролюється універсальним лаборато-

ним рефрактометром ИРФ-23.

Для прискорення процесу розчинення холодоагенту в мастилі й вирівнювання поля температур застосовувалася магнітна мішалка 3 у рівноважній камері змішання. У проведених дослідженнях температура визначалася з похибкою 0,015 К, тиск - $(0,33...2,4)$ %, концентрація рідкої фази розчину - $0,0053...0,0065$ %.

У дисертації вперше отримані експериментальні дані розчинності холодоагенту R-600a з мінеральним мастилом Reniso WF 15A у діапазоні температур $333 \leq T \leq 393$ К і тисків $5,9 \leq P \leq 28,4$ бар на двох заправних концентраціях, які були включені у вихідний масив даних по дослідженню фазових рівноваг рідина-пар (див. розділ 2). Проведений аналіз показав, що дані з розчинності холодоагенту R-600a у компресорному мастилі Reniso WF 15A описуються рівнянням (1) з похибкою, що не перевищує похибку опису експериментальних даних з тиску насиченої пари розчину R-600a/Reniso WF 15A, отриманих статичним методом.

На рисунках 8.а й 8.б зображені відхилення експериментальних даних з тиску насиченої пари розчину R-600a/Reniso WF 15A, отриманих статичним методом, і відхилення експериментальних даних з розчинності холодоагенту R-600a у компресорному мастилі Reniso WF 15A від розрахованих за рівнянням (1). Таким чином, підтверджений висновок про працездатність розробленої й створеної експериментальної установи для вивчення селективної розчинності багатоконпонентних холодоагентів у компресорних мастилах.

Четвертий розділ присвячений експериментальному дослідженню ентальпії розчинів R-600a/Reniso WF 15A у широкому інтервалі концентрацій.

Досліди по дослідженню ентальпії розчинів R-600a/Reniso WF 15A проводилися на установці, що реалізує метод змішання в крижаному калориметрі сталої температури. Принцип виміру кількості теплоти, підведеної до калориметра, заснований на використанні ефекту зміни об'єму калориметричної речовини (льоду) при плавленні. Даний метод відрізняється надійним способом створення адіабатних умов і відносною простотою конструкції експериментальних установок поряд з високою точністю одержуваних експериментальних даних.

Схема експериментальної установки представлена на рисунку 9. Основними вузлами й елементами установки є: контейнер для досліджуваної речовини 4; масивний мідний термостат 12; калориметрично посудина 2, заповнена очищеною від розчиненого повітря дистильованою водою з мірної посудини 23; посудина Дьюара 1 з льодом, що тане; калібрована скляна трубка 24 діаметром $(2,644 \pm 0,0025)$ мм для виміру об'єму льоду, що розплавився, попередньо замороженого на мідну гільзу 6. Установка оснащена вакуумною системою, що складається з форвакуумного 30 і дифузійного 29 насосів, криогенних пасток 28, термпарних манометричних перетворювачів 26, 31 і іонізаційного манометра 27.

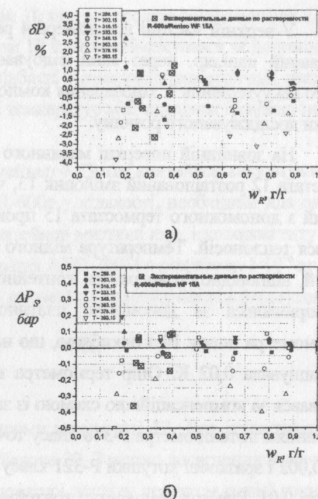


Рис. 8. Графіки відхилень для тиску насиченої пари і розчинності холодоагенту R-600 у мастилі Reniso WF 15A при різних температурах

У верхній частині контейнера 4 розташований капіляр, через який відбувається його вакуумування й заправлення компонентами досліджуваного розчину.

На зовнішній поверхні масивного термостата 12 розташований змійовик 13, через який з допоміжного термостата 15 прокачувався теплоносій. Температура мідного блоку й, відповідно, температура контейнера 4 вимірювалася за допомогою платинового термометра опору 14 з похибкою, що не перевищувала 0,02 К. Опір термометра вимірювався за компенсаційною схемою із застосуванням потенціометра Р-348 класу точності 0,002 і зразкової котушки Р-321 класу точності 0,01. Рівність температур контейнера 4 і термостата 12, а також процес охолодження контейнера в калориметричній посудині контролювалися диференціальною термопарою, показання якої вимірювалися мілівольтметром 17 типу Ф-136. Один спай диференціальної термопари був закріплений на поверхні контейнера, а два інших розташовувалися в термометричних кишнях мідного блоку й посудині Дьюара 8.

Масивний термостат 12 з'єднаний з калориметричною посудиною 2 тонкостінною нержавіючою трубою 10 (товщина стінки 0,2 мм). У нижній частині труби встановлена масивна мідна гільза 6, що забезпечувала інтенсивний і рівномірний відвід теплоти від контейнера з досліджуваним зразком до льоду, що тоне, 5. Наморожування льоду 5 на зовнішній поверхні мідної гільзи 6 здійснювалося за рахунок охолодження при кипінні в ній холодоагенту R-134a, що попередньо в необхідній кількості заправлявся з балончика 21.

Кількість льоду, що розплавився на мідній гільзі, визначалася по зміні рівня води в каліброваній скляній трубці 24. Вимір рівнів менісків води в каліброваній трубці в процесі експерименту здійснювався катетометром 25 марки КМ-6 з похибкою 0,015 мм.

Переміщення контейнера (з мідного термостата 12 у калориметричній посудині 2 й назад) здійснювалося за допомогою магнітної підвіски, що складається з феромагнітного сердечника 19 і постійного магніту 20. Феромагнітний сердечник пов'язаний з контейнером тонкою шовковою ниткою 11 діаметром 0,2 мм.

З метою зменшення теплових втрат конвекцією в навколишнє середовище від контейнера, що пе-

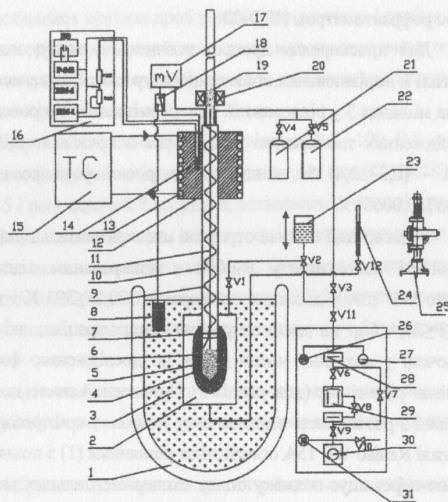


Рис. 9. Схема експериментальної установки:

1 - посудина Дьюара; 2 - калориметрична посудина з дистильованою водою; 3 - суміш вода-лід; 4 - контейнер; 5 - лід; 6 - мідна гільза; 7 - екрани; 8 - термометрична склянка; 9 - пружина; 10 - труба; 11 - нитка підвісу; 12 - мідний блок (термостат); 13 - змійовик; 14 - платиновий термометр опору; 15 - термостат; 16 - система виміру температури; 17 - мілівольтметр; 18 - перемикач контактів диференціальної термопари; 19 - феромагнітний сердечник; 20 - постійний магніт; 21 - балон з холодоагентом; 22 - балон з гелієм; 23 - мірна посудина з дистильованою водою; 24 - калібрована скляна трубка; 25 - катетометр; 26, 31 - термопарний перетворювач; 27 - іонізаційний перетворювач; 28 - вакуумна пастка; 29 - дифузійний насос; 30 - форвакуумний насос.

ребує в калориметричній посудині 2, внутрішній об'єм труби 10 під час дослідів вакуумувався. Променистий теплообмін між контейнером і масивним термостатом 12 істотно обмежувався за допомогою двох екранів 7, закріплених на нитці 11 над контейнером 4. Адіабатні умови в калориметричній системі забезпечувалися також за рахунок підтримки нульової різниці температур між калориметричною посудиною 2 і льодом, що тоне, 5 у посудині Дьюара 1.

Зразок мастила заправлявся в попередньо зважений контейнер 4. Потім контейнер вакуумувався, охолоджувався рідким азотом і заправлявся холодоагентом R-600a у кількості, необхідній для одержання необхідної концентрації РХМ. Маса заправлених у контейнер мастила m_{OL} і холодоагенту m_R визначалися за результатами його зважування на аналітичних вагах АДВ-200М с похибкою $1 \cdot 10^{-6}$ кг.

Масова концентрація холодоагенту w_R у досліджуваному розчині розраховувалася за формулою:

$$w_R = \frac{m_R - m_R^{vap}}{m_R + m_{OL} - m_R^{vap}}, \quad (8)$$

де m_R^{vap} - маса холодоагенту, що перебуває у паровій фазі.

Нагрівання контейнера із РХМ здійснювалося у масивному термостаті 12. Для інтенсифікації цього процесу труба 10 заповнювалася газоподібним гелієм з балона 22. З метою досягнення в розчині термодинамічної рівноваги контейнер витримувався при температурі дослідів протягом однієї години, після чого опускався в мідну гільзу. Із цього моменту починався основний період експерименту, під час якого з певною періодичністю вимірювався рівень води в каліброваній трубці 24. Дослід завершувався, коли контейнер приймав температуру льоду, що тоне, а теплопритоки в калориметричну систему ставали незмінними в часі.

Кількість теплоти, передана зразком РХМ льоду, що тоне, у процесі експерименту, розраховувалася за формулою:

$$Q_{mix}(T) = Q - Q_{TH} - Q_A - Q_{C_p}^{vap} - Q_r^{vap}, \quad (9)$$

де Q - загальна кількість теплоти, яка була підведена до калориметричної системи в процесі експерименту; Q_{TH} - кількість теплоти, що надійшла до калориметричної посудини у результаті теплопритоків; Q_A - кількість теплоти, передана льоду, що тоне, від порожнього контейнера (визначена за результатами тарувальних дослідів); Q_r^{vap} - кількість теплоти, що виділилася в процесі охолодження парової фази зразка РХМ; $Q_{C_p}^{vap}$ - кількість теплоти, що виділилася в процесі конденсації холодоагенту з парової фази РХМ.

У результаті виконаного експериментального дослідження була виміряна ентальпія компресорного мастила Reniso WF 15A і його розчинів з холодоагентом R-600a у діапазоні температур від 273,15 до 353,15 К. За оцінкою авторів, повна абсолютна похибка експериментальних даних не перевищує 0,75 Дж/г.

Питоме значення ентальпії досліджуваного зразка РХМ розраховувалося за формулою:

$$h'_{mix}(T) = Q_{mix}(T)/m + h_0, \quad (10)$$

де m - середнє (протягом дослідів) значення маси рідкої фази досліджуваного зразка РХМ; h_0 - значення ентальпії в початку відліку, за яку було прийнято стан киплячої рідини R-600a при температурі 273,15 К. Значення ентальпії в цьому стані було прийнято рівним 200 кДж/кг.

Аналітичний опис отриманих експериментальних даних з ентальпії рідкої фази розчинів R-600a/Reniso WF 15A проводився з використанням рівняння [1]:

$$\ln(h'_{mix}) = \ln(h_c) + h'_0 \cdot \tau^{\beta \cdot F'_h(\tau)}, \quad (11)$$

де h'_0, β – коефіцієнти, обумовлені з експериментальних даних; h_c – значення ентальпії в критичній точці; $\tau = \ln(T_c/T)$ – зведена температура; $F'_h(\tau)$ – універсальна для неасоційованих речовин кросоверна функція [1].

Слід зазначити, що діапазон зведених температур, у якому була досліджена ентальпія компресорного мастила, виходить за межі застосованості рівняння (11). Тому використовувати в рівнянні (11) універсальну кросоверну функцію не представляється можливим. З метою збереження високих екстраполяційних можливостей рівняння (11) було запропоновано розраховувати кросоверну функцію для розчинів по рівнянню:

$$F'_{h_{mix}}(\tau) = F'_h(\tau)_{REF} \cdot w_R + F'_h(\tau)_{OIL} \cdot (1 - w_R), \quad (12)$$

де $F'_h(\tau)_{OIL}, F'_h(\tau)_{REF}$ – індивідуальні кросоверні функції для мастила й холодоагенту, відповідно, які були отримані при апроксимації даних з ентальпії компонентів розчину.

Виконана обробка отриманих експериментальних даних показує, що кореляція (11) адекватно, в межах експериментальної похибки, описує температурно-концентраційну залежність ентальпії РХМ і може бути рекомендована як для розрахунку таблиць довідкових даних, так і для вирішення екстраполяційних завдань.

Концентраційні залежності ентальпії розчинів компресорного мастила Reniso WF 15A з холодоагентом R-600a демонструє рисунок 10.

Як показують проведені в [1] дослідження фазових рівноваг, густини й поверхневого натягу РХМ, їхні термодинамічні властивості істотно відрізняються від властивостей ідеальних рідких розчинів. Тому при вивченні ентальпії РХМ виникає необхідність коректного визначення теплових ефектів змішання.

Стосовно до розрахунку ентальпії змішання для РХМ дане питання залишається недостатньо вивченим. Ряд авторів при розрахунку ентальпії РХМ взагалі не враховують ефект змішання, вважаючи, що його внесок в ентальпію розчину невеликий (не маючи для цього ніяких експериментальних підтверджень). Інші автори вживали спроби розрахунку ентальпії змішання із даних з фазових рівноваг рідина-пар для РХМ, використовуючи формулу Кірхгофа.

Отримані у роботі результати експериментального дослідження ентальпії розчинів R-600a/Reniso WF 15A уперше дозволили коректно виконати аналіз значень ентальпії змішання, а також зіставити експериментальні дані з величинами, розрахованими за формулою Кірхгофа:

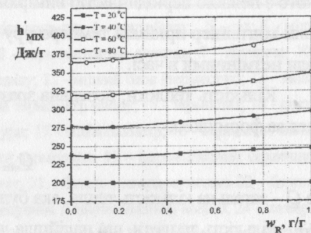


Рис. 10. Концентраційна залежність ентальпії розчинів мастила Reniso WF 15A з холодоагентом R-600a при різних температурах

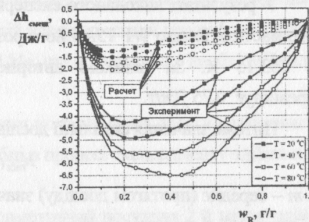


Рис. 11. Концентраційна залежність ентальпії змішання розчинів мастила Reniso WF 15A з холодоагентом R-600a при різних температурах

$$\Delta h_{смеш} = -w_R \frac{RT^2}{M_R} \left[\frac{\partial \ln(P_S/P_R^0)}{\partial T} \right]_{w_R}, \quad (13)$$

де M_R – молекулярна маса холодоагенту; P_S, P_R^0 – тиск насиченої пари розчину й холодоагенту відповідно.

Дійсна ентальпія змішання для розчинів мастила Reniso WF 15A з холодоагентом R-600a визначалася як різниця:

$$\Delta h_{смеш, змеш} = h'_{mix} - (h_{REF} \cdot w_R + h_{OIL} \cdot (1 - w_R)), \quad (14)$$

де h_{REF}, h_{OIL} – ентальпії холодоагенту й мастила відповідно; h'_{mix} – ентальпія розчину, розрахована за формулою (11).

На рисунку 11 наведені значення ентальпії змішання, розраховані за формулами (13) і (14).

Із зіставлення відповідних величин виходить, що реальні значення ентальпії змішання для РХМ істотно перевищують дані, отримані за формулою Кірхгофа (13).

Варто відзначити, що питома холодопродуктивність і адиабатна робота стиску в компресорі визначаються як різниця ентальпії реального робочого тіла, що має різні концентрації домішок мастила у відповідних точках термодинамічного циклу. Тому, хоча абсолютні значення ентальпії змішання й невеликі, похибка у їхньому визначенні може призвести до істотних помилок при оцінці показників ефективності термодинамічного циклу.

П'ятий розділ дисертації присвячений розробці діаграм тиск-ентальпія ($\lg P - h$) і діаграм Меркеля ($h - w_R$) для реального робочого тіла R-600a/Reniso WF 15A, а також визначенню впливу домішок мастила Reniso WF 15A у холодоагенті R-600a на енергетичні характеристики холодильного устаткування, що працює на R-600a. Показано, що наявність домішок мастила в холодоагенті значно впливає на його термодинамічні властивості, змінюючи тим самим положення точок холодильного циклу.

На підставі отриманої експериментальної інформації й з використанням запропонованих у дисертації методів розрахунку термодинамічних властивостей РХМ розроблені діаграми тиск-ентальпія, а також діаграма ентальпія-концентрація (діаграма Меркеля) для реального робочого тіла – R-600a/Reniso WF 15A при різних концентраціях мастила перед дросельним пристроєм – c_g (див. рис 12 і 13).

Присутність мастила в холодоагенті завжди зменшує різницю між ентальпією на вході у випарник і виході з нього у порівнянні із чистим холодоагентом, що знаходить своє відбиття на зміні як питомої холодопродуктивності, так і адиабатної роботи стиску, а, отже, і холодильного коефіцієнту.

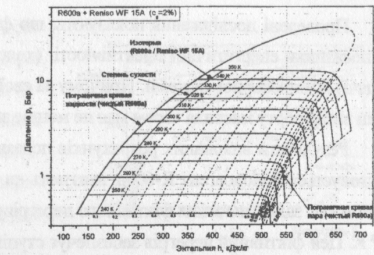


Рис. 12. Діаграма $\lg P - h$ робочого тіла R-600a/Reniso WF 15A при $c_g = 2\%$

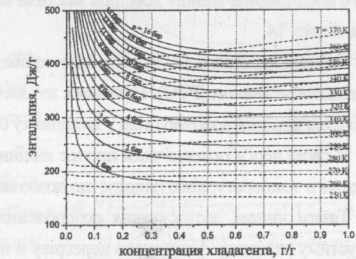


Рис. 13. Діаграма $h - w_R$ робочого тіла R-600a/Reniso WF 15A

Проведені дослідження показують, що фіктивний і регенеративний перегрів істотно впливають на показники енергетичної ефективності (холодопродуктивність, холодильний коефіцієнт, коефіцієнт подачі) компресорної системи. Причому за своїм впливом на холодопродуктивність компресорної системи вибір сорту мастила часом має не менше значення, ніж вибір самого холодоагенту.

Результати виконаних розрахунків показників ефективності компресорної системи, у якій використовується холодоагент R-600a, вказують на те, що мінімальне достатнє, з точки зору вирішення холодильних задач значення фіктивного перегріву (МДП) для даного робочого тіла становить приблизно 5-7 К. Цей фіктивний перегрів забезпечує ступінь сухості РРТ на виході з випарника близько 0,95 (при $c_g=4\%$). При даному фіктивному перегріві відносний внесок домішок мастила в зміну адіабатної роботи стиску становить порядку 4-5%, питомої холодопродуктивності – 1,5%, холодильного коефіцієнту – 5-7% на 1% концентрації мастила в холодоагенті перед дросельним пристроєм. Деякі результати виконаного дослідження впливу домішок мастила на показники ефективності компресорної системи демонструють рис. 14.

У дисертаційній роботі також були проведені розрахунки для холодильного циклу з регенеративним теплообмінником (РТО). Показано, що застосування РТО дозволяє досягати більшої ізотермічності процесів кипіння робочого тіла у випарнику без втрат енергетичної ефективності.

У свою чергу ізотермічний процес кипіння робочого тіла у випарнику призводить до збільшення середнього температурного напору, що дозволяє застосовувати теплообмінні апарати меншого розміру.

Таким чином, застосування розроблених діаграм тиск-ентальпія для РРТ дозволяє визначити припустиму величину фіктивного перегріву й перегріву в РТО, що забезпечує необхідну концентрацію рідкої фази РХМ для повернення в картер компресора.

Практична користь виконаних теоретичних досліджень складається в коректному обліку впливу домішок мастила на енергетичні характеристики компресорної системи з метою розробки рекомендацій стосовно до контролю над циркуляцією мастила й регулювання режиму роботи холодильного устаткування як на стадії випробувань, так і промислової експлуатації.

У даному розділі також проводиться порівняння отриманих результатів дослідження енергетичних характеристик компресорних систем працюючих на різних РРТ (R-600a/Reniso WF 15A, R-600a/ХМИ Азмол, R-134a+R-152a/ХФ 22c16, R-134a/Castrol Icematic SW22, R-134a/Mobil EAL Arctic 22, R-245fa/Planetel ACD 100FY), із результатами експериментальних досліджень, представлених у літературі [2]. Також на підставі проведених досліджень виконано порівняння впливу домішок різних компресорних масел на енергетичні характеристики компресорних систем, що працюють на однакових холодоагентах.

У результаті проведених розрахунків були побудовані залежності відносної зміни енергетичних характеристик компресорних систем для різних РРТ у порівнянні із чистим холодоагентом (рис. 15-17).

Так, при аналізі представленої на рисунках 15-17 інформації видно, що мастило Reniso WF 15A більше впливає на енергетичні характеристики компресорної системи працюючої на холодоагенті R-600a, ніж мастило ХМИ Азмол.

У той же час компресорне мастило Mobil EAL Arctic 22 більше впливає на енергетичні характеристики компресорної системи, ніж мастило Castrol Icematic SW 22 для системи, що працює на холодоагенті R-134a. Розходження в енергетичних характеристиках при заданих термодинамічних параметрах можуть становити: для питомої холодопродуктивності – 2%, для адіабатної роботи стиску – 4%, для холодильного коефіцієнта – до 5%.

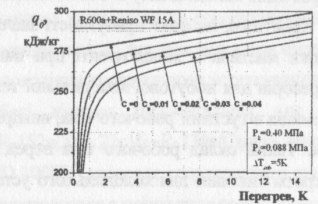
Таким чином, знаходить своє підтвердження раніше сформульований висновок про те, що вибір марки компресорного мастила може більше впливати на енергетичні характеристики компресорної системи, ніж вибір альтернативних холодоагентів.

Також у даному розділі проводиться порівняння розрахованих показників ефективності компресорної системи з результатами експлуатаційних випробувань. Результати експлуатаційних випробувань компресорної системи, що працює на робочому тілі R-600a/Reniso WF 15A, були отримані на ЗАТ «Атлант» (м. Мінськ). Холодопродуктивність компресорів визначалася за методиками і формулами, що відповідають ISO 917:1989 і ДСТ 17008-8.

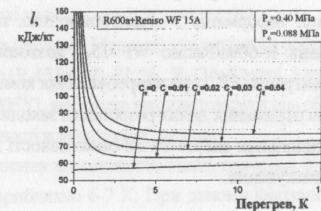
У результаті проведених випробувань компресорів були отримані наступні результати: потужність нагрівачів у калориметрі – 145,793 Вт; холодопродуктивність компресора – 148,686 Вт; холодопродуктивність компресора по витратоміру – 147,347 Вт; витрата робочого тіла – $4,365 \cdot 10^{-4}$ кг/с.

Параметри проведення випробувань: температура перед дросельним вентилям – 32,2 °С; тиск у конденсаторі – 7,76 бар; температура на виході з калориметра – 33,48 °С; тиск у випарнику (калориметр) – 0,605 бар (-24,3 °С).

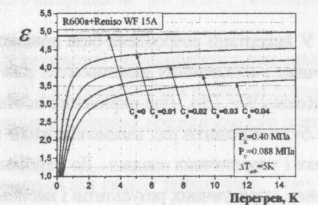
Аналізуючи отримані дані, можна констатувати, що на присутність домішок компресорного мастила в робочому тілі вказує отримана різниця в значеннях холодопродуктивності, що розраховувалася як за властивостями чистого холодоагенту (холодопродуктивність по компресору), так і по кількості енергії, що підводиться до випарника у процесі експерименту (потужність нагрівачів). Різниця між цими величинами (147,347 і 145,793) вказує на наявність у робочому тілі приблизно 0,75% мастила перед дросельним вентилям. Ця концентрація отримана з використанням даних з термодинамічних властиво-



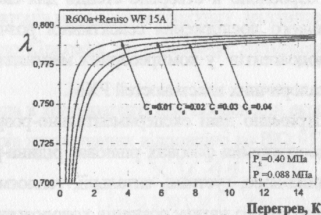
а



б



в



г

Рис. 14. Залежність питомої холодопродуктивності – q_v , питомої адіабатної роботи стиску – I_v , холодильного коефіцієнта – ϵ і коефіцієнта подачі – λ від величини фіктивного перегріву при різних концентраціях мастила в РРТ перед дросельним пристроєм c_g .

стей розчинів холодоагенту R-600a з мастилом Reniso WF 15A.

Крім того, на факт присутності значних (до 2%) домішки мастила в холодоагенті при випробуваннях компресорів для побутової холодильної техніки вказує інформація з густини робочого тіла, виміряна витратоміром. Такий склад робочого тіла перед дросельним пристроєм типовий для холодильного устаткування, у якому відсутні ефективні системи мастиловідділення на виході з компресора. Таким чином, отримана в дисертації інформація з термодинамічних властивостей розчинів R-600a/Reniso WF 15A дозволяє визначати концентрацію PPT при випробуваннях компресорів і на основі отриманих даних розробляти заходи, спрямовані на підвищення енергетичної ефективності холодильного устаткування.

ВИСНОВКИ Й РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертації розроблена база довідкових даних з термічних і калоричних властивостей для розчинів R-600a/Reniso WF 15A. Для вирішення поставленої мети треба було вирішити ряд взаємозалежних експериментальних і теоретичних завдань. До найбільш важливих наукових і практичних результатів і висновків, отриманих у дисертації, можуть бути віднесені:

1. Розроблено й створено стенди для експериментального дослідження селективної розчинності холодоагентів у компресорних мастилах і вивчення калоричних властивостей PXM.
2. Отримано дані експериментально-розрахункового дослідження фазових рівноваг рідина-рідина й рідина-пара, густини, ентальпії, теплоємності й поверхневого натягу розчинів холодоагенту R-600a з мастилом Reniso WF 15A.
3. Запропоновано метод дослідження, обліку поправок і обробки експериментальних даних для ентальпії розчинів холодоагент/мастило в адиабатному крижаному калориметрі.
4. Запропоновано методику визначення псевдокритичних параметрів для термодинамічного моделювання густини PXM.

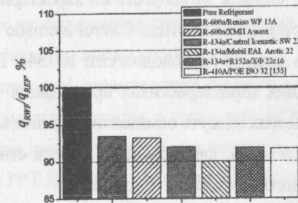


Рис. 15. Величина відносної зміни холодопродуктивності (q_{RWP}/q_{RWP0}) при концентрації мастила перед дросельним вентилем $c_g=4\%$ для різних PPT у порівнянні із чистим холодоагентом.

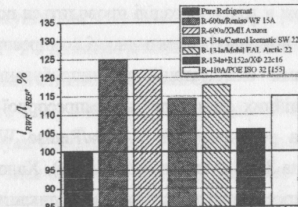


Рис. 16. Величина відносної зміни адиабатної роботи стиску (l_{RWP}/l_{RWP0}) при концентрації мастила перед дросельним вентилем $c_g=4\%$ для різних PPT у порівнянні із чистим холодоагентом.

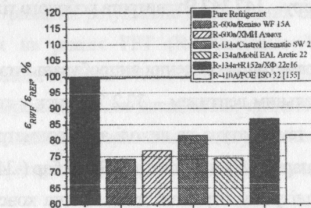


Рис. 17. Величина відносної зміни холодильного коефіцієнта ($\epsilon_{RWP}/\epsilon_{RWP0}$) при концентрації мастила перед дросельним вентилем $c_g=4\%$ для різних PPT у порівнянні із чистим холодоагентом.

5. Розроблено таблиці довідкових даних з термодинамічних властивостей розчинів R-600a з компресорним мастилом Reniso WF 15A. Інформація з тиску насиченої пари, густини, поверхневого натягу, ентальпії й теплоємності R-600a/Reniso WF 15A рекомендується до використання при проектуванні випарників, компресорів і теплообмінників нового покоління холодильного устаткування.
6. Установлено, що застосування розроблених у роботі діаграм тиск-ентальпії для PPT (R-600a/Reniso WF 15A, R-600a/XMI Аззол, R-134a+R-152a/ХФ 22c16, R-134a/Castrol Icematic SW22, R-134a/Mobil EAL Arctic 22, R-245fa/Planetel ACD 100FY) дозволяє розраховувати енергетичні характеристики компресорних систем, що добре узгоджуються з результатами експлуатаційних досліджень компресорів, дозволяючи, таким чином, ще на стадії проектування створювати умови одержання максимальної енергетичної ефективності холодильного устаткування.
7. Розроблено діаграми тиск-ентальпії й ентальпії-концентрація (діаграми Меркеля) для реального робочого тіла (R-600a/Reniso WF 15A, R-600a/XMI Аззол, R-134a+R-152a/ХФ 22c16, R-134a/Castrol Icematic SW22, R-134a/Mobil EAL Arctic 22, R-245fa/Planetel ACD 100FY), які зручно використовувати для обліку впливу домішок мастила на показники енергетичної ефективності компресорної системи.
8. Установлено, що мінімальне достатнє, з точки зору вирішення холодильних задач, значення фіктивного перегріву для R-600a/Reniso WF 15A становить приблизно 6-7 К. При даному фіктивному перегріві відносний внесок домішок мастила в зміну адиабатної роботи стиску становить порядку 4-5 %, питомої холодопродуктивності - 1,5 %, холодильного коефіцієнта - 5-7 % на 1 % концентрації мастила в холодоагенті перед дросельним пристроєм.
9. Одержав підтвердження висновку про те, що отримані в результаті експериментальних вимірювань термодинамічні властивості розчинів R-600a/Reniso WF 15A повинні бути віднесені до концентрацій рідкої фази розчину, що змінюється при ізохорному нагріванні досліджуваного зразка у вимірювальному осередку.
10. Встановлено, що склад поверхневого шару PXM відрізняється від складу рідкої фази. Тому при термодинамічному моделюванні густини й тиску насиченої пари повинні використовуватися різні значення псевдокритичних температур.
11. Доведено, що широко застосовувана в роботах різних авторів методика розрахунку надлишкової ентальпії для розчинів холодоагент/мастило за формулою Кірхгофа не забезпечує узгодження з отриманими в роботі експериментальними даними.
12. Запропоновано методику визначення концентрації мастила в холодоагенті при проведенні експлуатаційних випробувань холодопродуктивності компресорів виконуваних відповідно до ISO 917-89 і ДСТ 17008-8.

УМОВНІ ПОЗНАЧКИ Й ІНДЕКСИ

c_g – концентрації мастила в PPT перед дросельним пристроєм; C_p – ізобарна теплоємність, кДж/(кг·ДО); F , ψ – універсальні кросоверні функції; G – надлишок легколетучого компонента в поверхневому шарі рідкої фази, моль/м²; h – ентальпія, кДж/кг; l – питома робота адиабатного процесу стиску, кДж/кг; M – молекулярна вага, кг/кмоль; m – маса, кг; P – тиск, Па; q_0 – питома холодопродуктивність, кДж/кг; R – універсальна газова стала, кДж/(моль·К); T – абсолютна температура, К;

ХВ 1173
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

БІБЛІОТЕКА

універсальна газова стала, кДж/(моль·К); T – абсолютна температура, К; $t = |1 - T/T_c|$, $\tau = \ln(T_c/T)$ – зведена температура; V – об'єм, м³ (питомий, м³/кг; мольний, м³/моль); w – концентрація масова, кг/кг; n – концентрація мольна, моль/моль; α_R – критерій Ріделя; β і μ – критичні показники для густини і поверхневого натягу на лінії насичення, відповідно; Δ – різниця й абсолютна похибка; δ – середньоквадратичне відхилення й відносне відхилення; λ – коефіцієнт подачі; ρ – густина, кг/м³; σ – поверхневий натяг, Н/м;

Верхні індекси – зважене середнє значення або псевдокритичний параметр; *liq* – приналежність до рідкої фази; *vap* – приналежність до парової фази; *exs* – надлишкові властивості.

Нижні індекси L – приналежність до об'ємних властивостей; S – приналежність до поверхневих властивостей; PPT – реальне робоче тіло; ε_{ff} – ефективний; c – індекс критичних параметрів; mix – індекс розчину холодоагент/мастило; θ – параметри кипіння робочого тіла; oil – індекс мастила; R – індекс холодоагенту; s – властивість у стані насичення.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Диаграммы для растворов хладагент – масло: зб. наук. праць [“Сучасні проблеми холодильної техніки і технології”] / М-во освіти і науки України, Одес. держ. академія холоду. – Одеса: ОДАХ, 2005. – 134 с. (Спецвип.: додаток до журналу «Холодильна техніка і технології»).
2. Практические аспекты применения диаграмм давление-энтальпия для реальных рабочих тел: зб. наук. праць [“Сучасні проблеми холодильної техніки і технології”] / М-во освіти і науки України, Одес. держ. академія холоду. – Одеса: ОДАХ, 2005. – 134 с. (Спецвип.: додаток до журналу «Холодильна техніка і технології»).
3. Термодинамически согласованная методика прогнозирования термических и калорических свойств веществ на линии насыщения: материалы докладов и сообщений XI Российской конференции по теплофизическим свойствам, 4–7 октября 2005 г., Санкт-Петербург, Россия. Т. 1 / Акад. наук России, Санкт-Петерб. гос. ун-в. низк. и пищ. техн. [и др.]. – С.-П.: СПбГУНиПТ, 2005. – 320 с.
4. Железный В.П. Влияние примесей масла на теоретические показатели эффективности холодильной системы / В.П. Железный, Д.А. Проценко, С.В. Ниченко // Холодильная техника. – 2005. – №11. – С.42–45.
5. Железный В.П. Влияние примесей масла на теоретические показатели эффективности холодильной системы / В.П. Железный, Д.А. Проценко, С.В. Ниченко // Холодильная техника. – 2005. – №12. – С.34–37.
6. Влияние примесей компрессорного масла Planetelf ACD 100 FY на эффективность термодинамического цикла теплового насоса на хладагенте R245fa: зб. наук. праць за матеріалами міжнар. наук.-техн. конф. [“Промисловий холод і аміак”] / М-во освіти і науки України, Одес. держ. академія холоду. – Одеса: ОДАХ, 2006. – 168 с.
7. Фиктивный перегрев реальных рабочих тел в испарителе и кривые расслоения некоторых растворов хладагент/масло: зб. наук. праць за матеріалами міжнар. наук.-техн. конф. [“Промисловий холод і аміак”] / М-во освіти і науки України, Одес. держ. академія холоду. – Одеса: ОДАХ, 2006. – 168 с.

8. Вплив домішок мастила на теоретичні показники ефективності компресорної системи на робочому тілі R600a/ХМИ Аззол: зб. наукових праць [“Обладнання та технології харчових виробництв”] / М-во освіти і науки України, Донецький нац. унів. Економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Дон.: ДонНУЕТ, 2006. – 206 с.
9. Influence of admixtures of the compressor oil to the enthalpy of working fluid in evaporator : proc. 4-th international conference [“Compressors – 2004”], (Papiernička, Slovak Republic, 2004) / International Institute of Refrigeration – S. : IIR, 2004. – 685 p.
10. The Accounting of Oil Additives Effect on Energy Efficiency of Refrigerating Equipment: proc. 5-th international conference [“Problems of industrial heat engineering”] / National Academy of Sciences of Ukraine, Ins. of Engineering Thermophysics. – K.: Inst. of Engineering Thermophysics, 2007. – 323 p.
11. Влияние примесей компрессорного масла на показатели эффективности компрессорной системы: зб. наук. праць [“Сучасні проблеми холодильної техніки і технології”] / М-во освіти і науки України, Одес. держ. академія холоду. – Одеса: ОДАХ, 2005. – 148 с.
12. Экспериментальное исследование калорических свойств компрессорных масел и их растворов с хладагентами: зб. наук. праць [“Сучасні проблеми холодильної техніки і технології”] / М-во освіти і науки України, Одес. держ. академія холоду. – Одеса: ОДАХ, 2005. – 148 с.
13. Исследование давления насыщенных паров, плотности, капиллярной постоянной и поверхностного натяжения растворов изобутан/ Reniso WF 15A: зб. наук. праць [“Сучасні проблеми холодильної техніки і технології”] / М-во освіти і науки України, Одес. держ. академія холоду. – Одеса: ОДАХ, 2005. – 148 с.
14. Ниченко С.В. Экспериментальные исследования энтальпии растворов хладагента R-600a с маслом Reniso WF 15A / С.В. Ниченко, Ю.В. Семенюк, В.П. Железный, Д.А. Проценко, // Холодильная техника и технология. – 2008. – № 1. – С. 4-9.
15. An investigation of the thermophysical properties of solution refrigerant-compressor oil: R245fa/Planetelf ACD 100FY, R600a/HMI Azmol, R600a/Reniso WF 15A : proc. 5-th international conference [“Problems of industrial heat engineering”], (Kyiv, Ukraine, 22–26 May 2007) / National Academy of Sciences of Ukraine, Ins. of Engineering Thermophysics. – K.: Inst. of Engineering Thermophysics, 2007. – 323 p.
16. Семенюк Ю.В. Экспериментальное исследование растворимости хладагента R-600a в компрессорном масле Reniso WF 15A / Ю.В. Семенюк, С.В. Ниченко, В.П. Железный, В.В. Сеченых // Вестник Международной Академии Холода. – 2008. – № 1. – С. 10–14.
17. New method for prediction of the thermophysical properties for the refrigerant-oil solution : proc. 4-th international conference [“Physics of liquid matter: Modern problems”], (Kyiv, Ukraine, 23–26 May 2008) / Ministry of Education and Science of Ukraine, Taras Shevchenko Kyiv National University. – K.: Taras Shevchenko Kyiv National University, 2008. – 154 p.
18. Экспериментальное исследование и моделирование термодинамических свойств растворов R600a/Reniso WF 15A : зб. наукових праць [“Обладнання та технології харчових виробництв”] / М-во освіти і науки України, Донецький нац. унів. Економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Дон.: ДонНУЕТ, 2008. – 307 с.
19. Показатели эффективности компрессорной системы, работающей на R600a/Reniso WF 15A: зб.

наукових праць [“Обладнання та технології харчових виробництв”] / М-во освіти і науки України, Донецький нац. унів. Економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Дон.: ДонНУЕТ, 2008. – 307 с.

Особистий внесок автора в роботах, виконаних у співавторстві: [1, 3] – участь у розробці методів прогнозування термічних і калоричних властивостей речовин, розрахунки за запропонованими моделями і аналіз результатів розрахунку, підготовка матеріалів для публікацій і презентацій, доповіді на конференціях і участь у дискусіях; [2, 4, 5, 8, 9-11] – участь у розрахункових дослідженнях, підготовка матеріалів для публікацій і презентацій; [7, 12-19] – участь в експериментальному дослідженні, обробка експериментальних даних, розрахунки за запропонованими моделями, підготовка матеріалів для публікацій і презентацій, доповіді на конференціях і участь у дискусіях.

АНОТАЦІЯ

Ніченко С.В. Вплив компресорних мастил на термодинамічні властивості робочих тіл холодильного устаткування – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». – Одеська державна академія холоду, Одеса, 2008 р.

Дисертація присвячена комплексному експериментально-розрахунковому вивченню фазових рівноваг, термічних та калоричних властивостей на лінії насичення розчинів холодоагенту R-600a з мінеральним компресорним мастилом Reniso WF 15A, розробці з використанням отриманої інформації таблиць довідкових даних з термічних і калоричних властивостей для реального робочого тіла R-600a/компресорне мастило Reniso WF 15A, розробці діаграм тиск-ентальпія та ентальпія-концентрація (діаграми Меркеля) а також дослідженню впливу домішок мастила на показники енергетичної ефективності компресорної системи.

Для виконання поставлених у дисертації завдань використовувалась створена раніше експериментальна установка для проведення комплексних досліджень термодинамічних властивостей розчинів холодоагент/мастило (PXM), включаючи: фазові рівноваги, поверхневий натяг і густину розчинів холодоагенту R-600a с мастилом Reniso WF 15A. Також була створена експериментальна установка та проведені експериментальні дослідження калоричних властивостей розчинів холодоагент/мастило.

З використанням отриманих експериментальних даних розроблено діаграми тиск-ентальпія та ентальпія-концентрація. У додатку дисертації наведені вперше отримані експериментальні дані з термічних і калоричних властивостей для реального робочого тіла R-600a/Reniso WF 15A.

Вперше для реального робочого тіла R-600a/Reniso WF 15A виконано теоретичне дослідження впливу домішок мастила в холодоагенті на показники ефективності холодильного циклу. Показано, що присутність домішок мастила в холодоагенті призводить до значного зниження холодопродуктивності та холодильного коефіцієнта, досліджено вплив концентрації мастила у холодоагенті перед дросельним пристроєм, а також величини перегріву робочого тіла у випарнику на показники енергетичної ефективності циклу.

Показано, що підбір оптимального сорту мастила має не менше значення, ніж вибір альтернативного холодоагенту. Розроблені практичні рекомендації для забезпечення нормальної циркуляції домішок мастила у холодоагенті R-600a по контуру холодильної системи. У наслідку виконаного дослідження показано, що використання регенеративного теплообмінника при використанні у холодильному обладнанні холодоагенту R-600a дозволяє у значній мірі знизити негативну наявність домішок мастила у випарнику та підвищити показники енергетичної ефективності термодинамічного циклу компресорної системи.

Ключові слова: холодоагент, розчин холодоагенту з мастилом, експеримент, термодинамічні властивості, фазові рівноваги, методи прогнозування, критичні параметри, реальне робоче тіло, діаграми тиск-ентальпія, діаграма ентальпія-концентрація.

АННОТАЦИЯ

Ниченко С.В. Влияние компрессорных масел на термодинамические свойства рабочих тел холодильного оборудования – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика». – Одесская государственная академия холода, Одесса, 2008 г.

Диссертация посвящена комплексному экспериментально-расчетному изучению фазовых равновесий, термических и калорических свойств на линии насыщения растворов хладагента R-600a в минеральном компрессорном масле Reniso WF 15A, разработке с использованием полученной информации таблиц справочных данных по термическим и калорическим свойствам для реального рабочего тела R-600a/компрессорное масло Reniso WF 15A, разработке диаграмм давление-энтальпия и энтальпия-концентрация (диаграммы Меркеля), а также исследованию влияния примесей масла на показатели энергетической эффективности компрессорной системы.

Для осуществления поставленных в диссертации задач использовалась созданная ранее экспериментальная установка для проведения комплексных исследований термодинамических свойств растворов хладагент/масло (PXM), включая: фазовые равновесия, поверхностное натяжение, плотность растворов хладагента R-600a с маслом Reniso WF 15A. Также была создана экспериментальная установка и проведены экспериментальные исследования калорических свойств растворов хладагент/масло.

С использованием полученных экспериментальных данных разработаны диаграммы давление-энтальпия и энтальпия-концентрация для реального рабочего тела R-600a/Reniso WF 15A. В приложении диссертации представлены впервые полученные экспериментальные данные по термическим и калорическим свойствам растворов R-600a/Reniso WF 15A.

Впервые для реального рабочего тела R-600a/Reniso WF 15A выполнено теоретическое исследование влияния примесей масла в хладагенте на показатели эффективности холодильного цикла. Показано, что присутствие примесей масла в хладагенте приводит к значительному снижению холодопроизводительности и холодильного коэффициента, исследовано влияние концентрации масла в хладагенте перед дросельным устройством, а также величины перегрева рабочего тела в испарителе на показатели

тели энергетической эффективности цикла. Показано, что подбор оптимального сорта масла имеет не меньшее значение, чем выбор альтернативного хладагента. Разработаны практические рекомендации для обеспечения нормальной циркуляции примесей масла в хладагенте R-600a по контуру холодильной системы. В результате проведенного исследования показано, что применение регенеративного теплообменника при использовании в холодильном оборудовании хладагента R-600a позволяет в значительной мере снизить негативное влияние примесей масла в испарителе и повысить показатели энергетической эффективности термодинамического цикла компрессорной системы.

Ключевые слова: хладагент, раствор хладагента с маслом, эксперимент, термодинамические свойства, фазовые равновесия, методы прогнозирования, критические параметры, реальное рабочее тело, диаграммы давление-энтальпия, диаграмма энтальпия-концентрация.

ABSTRACT

Nichenko S.V. Influence of compressor oils on the thermodynamic properties of working fluids for refrigerating equipment – Manuscript.

Thesis for candidate of science (Engineering) degree by specialty 05.14.06 - «Technical Thermophysics and Industrial Thermal Engineering». – Odessa State Academy of Refrigeration, Odessa, 2008.

Dissertation is dedicated to the complex experimental and calculation investigation of phase equilibrium, thermal and caloric properties on the saturation line for solutions of R-600a with mineral compressor oil Reniso WF 15A, to development with the use of obtained information of reference data tables on thermal and caloric properties for the real working fluid R-600a/compressor oil Reniso WF 15A, to development of pressure-enthalpy diagrams and enthalpy-concentration diagrams (diagrams of Merkel), and also to research of influencing of compressor oil admixtures on the efficiency of the compressor system.

The created earlier experimental setup was used of complex investigation of thermodynamic properties of refrigerant oil solutions (ROS), including: phase equilibrium, surface-tension, density of R-600a with Reniso WF 15A compressor oil solutions. The experimental setup for investigation of caloric properties of refrigerant oil solutions was also created and the experimental investigation of caloric properties was performed.

With the use of the obtained experimental data the pressure-enthalpy diagrams and enthalpy-concentration diagrams (diagrams of Merkel) for the real working body of R-600a/Reniso WF 15A was developed. In the appendix of dissertation the experimental data on caloric and thermal properties of R-600a/Reniso WF 15A solutions are presented.

The results of theoretical research of influence of oil admixtures in the refrigerant on the efficiency of refrigeration machine working with the real working fluid R-600a/Reniso WF 15A are presented. It is shown that the presence of oil admixtures in refrigerant results in the decrease of refrigerating efficiency and coefficient of performance. Practical recommendations are developed for providing of normal circulation of oil admixtures circulating through the refrigeration system.

Keywords: refrigerant, refrigerant-oil solution, experiment, thermodynamic properties, phase equilibrium, methods of predicting, critical parameters, a real working fluid, pressure-enthalpy diagrams.