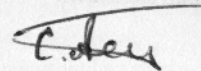


Автореф  
АҫИ

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

**АНЧЕРБАК СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ**



УДК 544.015.32:  
621.564:621.546.3

**ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РОЗЧИНІВ ХОЛОДОАГЕНТУ R-245fa  
З КОМПРЕСОРНИМ ПОЛІЕФІРНИМ МАСТИЛОМ**

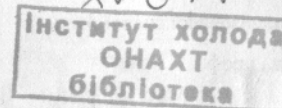
**(Експеримент, методи прогнозування)**

Спеціальність 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Одеса – 2007



Дисертація є рукописом

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

**Науковий керівник** – доктор технічних наук, професор **Желзний Віталій Петрович**, Одеська державна академія холоду, професор кафедри інженерної теплофізики.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор **Геллер Володимир Зіновійович**, Одеська національна академія харчових технологій, професор кафедри екології харчових продуктів і виробництва;

доктор фізико-математичних наук, **Локотеш Тетяна Володимирівна**, Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, старший науковий співробітник ОНУ ім. І.І. Мечникова.

Захист дисертації відбудеться “ 24 ” вересня 2007 р. о 13<sup>00</sup> годині 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, 65026, Україна.

можна ознайомитися у бібліотеці ОДАХ за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса,

серпень 2007 р.

Мілованов В.І.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Реальні робочі тіла (PPT) у більшості типів холодильного устаткування є розчинами холодоагент/компресорне мастило (РХМ). Через це коректний аналіз можливостей підвищення енергетичної ефективності використання нових озоноруйнівних холодоагентів у холодильній техніці можливий тільки за наявності інформації про термодинамічні властивості РХМ, найбільш надійним способом одержання якої залишається експеримент. Однак у періодичних виданнях і довідковій літературі дотепер практично відсутні дані з поверхневого натягу, густини, фазових рівноваг і ентальпії для більшості альтернативних PPT. Таким чином, створення інформаційної бази даних з термодинамічних властивостей маловивченого холодоагенту R-245fa, перспективного для застосування в новому поколінні теплових насосів, і його розчинів з компресорним мастилом на підставі експериментальних досліджень є актуальним завданням.

Оскільки в умовах безупинного розширення номенклатури холодоагентів і великої кількості марок компресорних мастил можливості експериментального дослідження властивостей чистих речовин і розчинів досить обмежені, пріоритетним науковим напрямком залишається подальший розвиток методів розрахунку й прогнозування термодинамічних властивостей PPT.

Разом з тим можливості експериментального дослідження властивостей чистих речовин і розчинів досить обмежені. Тому за умов безупинного розширення номенклатури холодоагентів і великої кількості марок компресорних мастил, що випускаються промисловістю, пріоритетним науковим напрямком залишається подальший розвиток методів розрахунку й прогнозування термодинамічних властивостей PPT.

Крім того, важливе прикладне значення мають розглянуті в дисертації питання, пов'язані з оцінкою впливу домішок мастила в PPT на показники енергетичної ефективності компресорної системи.

Серед великої кількості дослідників, котрі плідно працювали за вищевказаними науковими напрямками, і на роботи яких автор опирався при вирішенні розглянутих у дисертації проблем, слід назвати імена таких відомих учених: Анісімов М.О., Бадилькес І.С., Вамлінг Л. (Vamling L.), Ватанабе К. (Watanabe K.), Геллер В.З., Йокозеки А. (Yokozeki A.), Крузе Х. (Kruse H.), Лавренченко Г.К., Мазур В.О., Мельцер Л.З., Молдовер М.Р. (Moldover M.R.), Рабінович В.А., Сенджерс Дж. В. (Sengers J.V.), Філіппов Л.П. та ін.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до: Постанови Верховної Ради України від 4.02.2004 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 T05K-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 роботи є:** створення бази довідкових даних з термодинамічних властивостей перспективного для застосування в новому поколінні теплових насосів і кондиціонерів озононеруйнівного холодоагенту R-245fa і його розчинів з компресорним мастилом Planetelf ACD 100FY; подальший розвиток методів прогнозування термодинамічних властивостей речовин на лінії насичення, заснованих на принципах скейлінга і принципі двопараметричної універсальності; оцінка впливу домішок компресорного мастила Planetelf ACD 100FY у холодоагенті R-245fa на енергетичні показники компресорної системи.

**Об'єктами дослідження є** розчини озононеруйнівного холодоагенту R-245fa з поліефірним компресорним мастилом Planetelf ACD 100FY.

**Предметом дослідження є:** термодинамічні властивості розчинів холодоагенту в компресорному мастилі; методи прогнозування термодинамічних властивостей речовин на лінії насичення; діаграми тиск-ентальпія для PPT R-245fa/Planetelf ACD 100FY; показники енергетичної ефективності компресорної системи теплового насоса при використанні робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100FY.

Для досягнення поставленої мети було необхідно виконати такі завдання:

- здійснити експериментально-розрахункове дослідження фазових рівноваг рідина-рідина, рідина-пара, густини й поверхневого натягу розчинів озононеруйнівного холодоагенту R-245fa з комерційним мастилом Planetelf ACD 100FY;
- адаптувати принципи скейлінга до прогнозування калоричних властивостей холодоагентів і РХМ на лінії насичення;
- розробити таблиці довідкових даних з термодинамічних властивостей розчинів холодоагенту R-245fa з компресорним мастилом Planetelf ACD 100FY;
- розробити діаграми тиск-ентальпія для реального робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100FY;
- виконати оцінку впливу домішок компресорного мастила в PPT на показники енергетичної ефективності компресорної системи й розробити практичні рекомендації щодо забезпечення нормальної циркуляції домішок мастила в холодоагенті контуром холодильної установки.

Виконання сформульованих завдань здійснено в рамках таких методів дослідження як: експериментальні дослідження, включаючи:

- вимірювання тиску насиченої пари, густини, поверхневого натягу, критичних параметрів холодоагенту R-245fa;
- дослідження фазових рівноваг, температури нормального кипіння, густини, поверхневого натягу розчинів R-245fa/Planetelf ACD 100FY;
- теоретичні дослідження, включаючи:
  - розробку методики прогнозування калоричних властивостей на лінії насичення і поверхневого натягу чистих речовин;
  - розрахунок таблиць довідкових даних з термодинамічних властивостей для робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100FY;
  - розробку діаграм тиск-ентальпія для реального робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100FY;
  - оцінку показників ефективності компресорної системи теплового насоса з урахуванням впливу домішок мастила в холодоагенті на термодинамічні властивості робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100FY;

**Наукова новизна** виконаної роботи полягає в тому, що:

- у результаті проведеного експериментального дослідження уточнено існуючі літературні дані з критичних параметрів і термічних властивостей холодоагенту R-245fa на лінії насичення;
- уперше проведено експериментально-розрахункове дослідження фазових рівноваг рідина-рідина та рідина-пара, нормальної температури кипіння, густини й поверхневого натягу розчинів R-245fa/Planetelf ACD 100FY;
- одержала подальший розвиток методика прогнозування термодинамічних властивостей холодоагентів і РХМ, побудована на принципах скейлінга, стосовно розрахунку калоричних властивостей речовин і парахора;
- у рамках запропонованої методики прогнозування термодинамічних властивостей речовин на лінії насичення проведено аналіз значень для низки універсальних комплексів амплітуд, на підставі якого вперше показано, що деякі з розглянутих комплексів залежать від критерію Ріделя;
- уперше розроблено таблиці довідкових даних з термодинамічних властивостей розчинів R-245fa/Planetelf ACD 100FY і на їхній основі розроблено діаграми тиск-ентальпія для реального робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100FY;
- уперше виконано аналіз впливу домішок мастила Planetelf ACD 100FY у холодоагенті R-245fa на показники енергетичної ефективності компресорної системи та розроблено практичні рекомендації щодо забезпечення нормальної циркуляції домішок мастила в холодоагенті контуром холодильної установки.

На підставі отриманих результатів у дисертації сформульовані й захищаються такі **наукові положення:**

**1. Прості двоконстантні термодинамічно узгоджені степеневі рівняння з ефективними показниками, що універсально залежать від зведеної температури  $t = 1 - T/T_c$ , адекватно описують калоричні функції на бінодалі для неасоційованих речовин.** Дане наукове положення обґрунтовується емпірично підтвердженим універсальним характером змінення флуктуацій термодинамічних функцій і апробацією запропонованих автором рівнянь на великому масиві довідкових даних для різних речовин. Розроблені на підставі цього наукового положення методи прогнозування термодинамічних властивостей речовин вирізняються серед відомих методик більш високою точністю розрахунку калоричних властивостей. Використання універсальних комплексів амплітуд і співвідношень між критичними індексами забезпечує термодинамічну узгодженість одержуваної розрахункової інформації.

**2. При виборі альтернативних речовин, призначених для використання в холодильному встаткуванні нового покоління, аналіз показників ефективності компресорної системи слід виконувати з урахуванням впливу домішок компресорного мастила в холодоагенті на термодинамічні властивості реальних робочих тіл (розчинів холодоагент/мастило).** У даному науковому положенні підкреслюється істотний вплив домішок мастила на термодинамічні властивості PPT і на показники ефективності компресорної системи. Рівень наукової обґрунтованості заходів, спрямованих на підвищення ефективності холодильного встаткування, зростає за рахунок залучення додаткової інформації про концентрацію мастила в PPT при застосуванні розроблених у дисертації діаграм тиск-ентальпія для реальних робочих тіл.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових результатів і наукових положень забезпечені коректною постановкою виконаних досліджень і підтверджуються проведеним аналізом похибок ек-

спериментальних даних та узгодженістю отриманих даних про густину, поверхневий натяг, тиск насиченої пари і критичні параметри з найбільш надійною літературною інформацією з термодинамічних властивостей об'єкта дослідження (R-245fa).

**Практична цінність** результатів роботи полягає в тому, що отримані дані з термодинамічних властивостей розчинів R-245fa/Planetel ACD 100FY та побудовані для цього PXM діаграми тиск-ентальпія являють собою достатньо повну за обсягом інформаційну базу, необхідну при проектуванні й проведенні експлуатаційних досліджень нового покоління холодильної техніки.

Застосування запропонованих методів розрахунку (прогнозування) термодинамічних властивостей речовин дозволяє скоротити обсяг необхідних експериментальних досліджень і тим самим знизити вартість виконання дослідницьких програм, пов'язаних з переведенням холодильного устаткування на альтернативні холодоагенти. Крім того, термодинамічна узгодженість запропонованих кореляцій створює умови для проведення експертної оцінки вірогідності літературної інформації про термічні й калоричні властивості холодоагентів.

Отримані дані про термодинамічні властивості робочого тіла R-245fa/Planetel ACD 100FY і результати дослідження впливу домішок мастила на показники енергетичної ефективності компресорної системи передано в АТ «НОРД» (м. Донецьк), ВАТ «РЕФМА» (м. Мелітополь), Термодинамічний центр Держнафтогазпрому Мінпаливенерго України для практичного впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація виконувалась за консультацій наукового керівника. На окремих етапах роботи в ній брали участь співробітники лабораторії кафедри інженерної теплофізики ОДАХ – співавтори публікацій. Особисто здобувачем створено експериментальну установку для комплексного вивчення фазових рівноваг, густини, поверхневого натягу й критичних параметрів речовин, виконано основний обсяг експериментальних досліджень фазових рівноваг і термодинамічних властивостей чистого холодоагенту R-245fa і PXM R-245fa/Planetel ACD 100FY, розраховано таблиці довідкових даних з термодинамічних властивостей PXM, побудовано діаграми тиск-ентальпія для PPT, проведено теоретичну оцінку впливу домішок мастила на енергетичну ефективність компресорної системи, а також розроблено степеневі кореляції для прогнозування калоричних властивостей речовин на лінії насичення.

**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 аміак», м. Одеса, 2006; 6-й Міжнародній конференції з компресорів і холодоагентів «Компресори-2006», м. Паперничка (Словаччина), 2006. Крім того, наукові результати, викладені в дисертації, доповідалися співавторами робіт на 5-й Міжнародній конференції з компресорів і холодоагентів «Компресори-2004», м. Паперничка (Словаччина), 2004; XI Російській конференції з теплофізичних властивостей речовин, м. Санкт-Петербург (Росія), 2005; 16-ому Симпозіумі з теплофізичних властивостей речовин, м. Болдер (США), 2006.

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладено в 13 статтях, опублікованих у фахових періодичних журналах, які відповідають вимогам ВАК України, та у 13 друкованих працях, опублікованих у формі доповідей і тез у збірниках наукових праць міжнародних конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури й додатків. Робота містить 244 сторінок тексту, 82 рисунка, 52 таблиці і список літератури з 228 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, відображено її зв'язок з існуючими державними програмами й держбюджетною науковою тематикою ОДАХ, сформульовано мету й визначено завдання дослідження. Наведено наукові положення, зазначено особистий внесок здобувача та відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи й публікації.

У першому розділі наведено огляд опублікованих експериментальних і теоретичних робіт, присвячених вивченню фазових рівноваг (рідина-рідина, рідина-пара) та густини розчинів озонобезпечних холодоагентів з компресорними мастилами.

Аналіз проведених експериментальних досліджень термодинамічних властивостей PXM свідчить, що в літературі міститься досить обмежена інформація про термічні властивості розчинів озононеруйнівних холодоагентів з компресорними мастилами. При цьому більшість робіт присвячено вимірам параметрів фазових рівноваг рідина-рідина й рідина-пара. Дослідження ж термічних і калоричних властивостей розчинів перспективного для систем кондиціонування й теплових насосів холодоагенту R-245fa з комерційними мастилами дотепер не здійснювалися.

У значній кількості опублікованих статей розглянуто питання, пов'язані з розрахунковими методами дослідження термодинамічних властивостей PXM. Не зупинюючись на деталях і особливостях застосовуваних розрахункових методик, можна констатувати, що тут існує декілька серйозних проблем, серед яких слід відзначити такі:

- Майже відсутньою є базова інформація про молекулярну масу, структуру, склад, критичні (псевдокритичні) параметри для комерційних компресорних мастил.
- Для емпіричної інформації про термічні властивості PXM є характерними високі похибки, основними джерелами котрих можуть бути як випадкові фактори, так і недоліки експериментальних методик. Тому значення калоричних величин, отримані за результатами розрахунків з використанням термічного рівняння стану, мають високий ступінь невизначеності.
- Емпірична інформація про калоричні властивості PXM у літературі практично відсутня.
- Для реальних робочих тіл (розчинів холодоагент/мастило) права (парова) погранична крива не існує, через що при розрахунковому дослідженні фазових рівноваг PXM застосування правила Максвелла не є ефективним.
- Експериментальні дослідження однакових PXM різними авторами не проводилися, тому всі відомі з літератури дані мають невідтверджену похибку.

З огляду на викладені обставини цілком зрозуміло, чому відомі розрахункові дослідження в основному зводяться до апроксимації існуючих даних з фазових рівноваг або до аналізу можливості застосування тієї чи іншої термодинамічної моделі для опису експериментальних даних.

На підставі проведеного аналізу визначено методи вирішення поставлених у дисертації завдань, спрямованих на поглиблене вивчення термодинамічних властивостей PXM і подальший розвиток існуючих методів прогнозування термодинамічних властивостей холодоагентів та складних термодинамічних систем, до яких належать розчини холодоагентів з мастилами.

У другому розділі розглянуто найбільш поширені підходи до розробки методів прогнозування теплофізичних властивостей речовин і виконано стислий аналіз їхніх достоїнств і недоліків. Сформульовано засади, на яких з використанням основних принципів скейлінга в дисертації здій-

снено розвиток методів розрахунку (прогнозування) термодинамічних властивостей речовин на бінодалі. Для апроксимації й прогнозування термічних і калоричних властивостей на бінодалі запропоновано низку малокоefficientних степеневих кореляцій, аналітична форма котрих має такий загальний вигляд:

$$Y_i = Y_{0i} \cdot t^{\lambda_i \psi_i(t)} \quad (1)$$

Деякі із поданих у дисертації кореляцій (для опису температурної залежності густини, капілярної сталої, поверхневого натягу, тиску насиченої пари) уже знайшли застосування при прогнозуванні термодинамічних властивостей холодоагентів і їхніх розчинів з мастилами. Кореляції для опису кривої розшарування бінарних розчинів, діелектричної проникності й показника заломлення на кривій розшарування та на бінодалі, ізотермічної стисливості, ізохорної й ізобарної теплоємностей, швидкості звуку, ентальпії, ентропії на бінодалі, ізохорної теплоємності на критичній ізохорі в дисертації запропоновано вперше.

Як коефіцієнти в запропонованих кореляціях фігурують критичні амплітуди, значення яких відбивають індивідуальні властивості речовин, і критичні показники степеня, значення яких у задачах прогнозування можуть розглядатися як універсальні константи.

Як показують розрахунки, проведені для великої кількості неасоційованих речовин, запропоновані рівняння адекватно описують експериментальні й табличні довідкові дані в широких інтервалах параметрів стану. Висока якість апроксимації температурних залежностей перелічених вище властивостей досягається як завдяки застосуванню скейлінгівських степеневих рівнянь (1), так і за рахунок використання універсальних для неасоційованих речовин кросоверних функцій. Таким чином, у дисертації пропонується застосовувати для термодинамічних функцій принцип двопараметричної універсальності у поєднанні з універсальними кросоверними функціями при критичних показниках степеня. У цьому підході отримує відображення загальний висновок про універсальний характер зміння флуктуацій термодинамічних величин, а, отже, і структури неасоційованих речовин у широкому інтервалі параметрів стану. При такому підході до прогнозування, маючи інформацію про значення двох амплітуд, інші критичні амплітуди можна визначити з декількох відомих універсальних співвідношень.

У розділі значна увага приділена дослідженню температурної залежності парахора. Цей структурно-адитивний комплекс широко використовується для прогнозування поверхневого натягу рідин. Уперше показано, що значення парахора для неасоційованих речовин універсально змінюються в залежності від зведеної температури у всьому інтервалі існування рідкої фази. З урахуванням кореляцій (1) для густини й поверхневого натягу аналітична форма для температурної залежності парахора має вигляд:

$$[P] = \frac{M \cdot \sigma_0^{\beta/\mu}}{\Delta \rho} \rightarrow [P] = \frac{M \cdot (\sigma_0 \cdot t^{\mu f(t)})^{\beta/\mu}}{\Delta \rho_0 \cdot t^{\beta F(t)}} = \frac{M \cdot \sigma_0^{\beta/\mu}}{\Delta \rho_0} \cdot t^{\beta [f(t) - F(t)]} \quad (2)$$

Виконаний аналіз показує, що за відомими значеннями парахора  $[P]$  з використанням універсальних комплексів можна розрахувати амплітуди інших властивостей речовин, забезпечуючи тим самим термодинамічне узгодження прогнозованих значень термічних і калоричних функцій. У дисертаційній роботі розраховано значення універсальних комплексів амплітуд, які найчастіше пропонуються в літературі. Деякі результати розрахунків наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Універсальні комплекси амплітуд і їхні значення

| Речовина  | Ar     | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | Kr     | SF <sub>6</sub> |
|---|--------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|--------|-----------------|
| Комплекси амплітуд  |        |                |                |                 |                 |        |                 |
| $[P] = \frac{M \cdot \sigma_0^{\beta/\mu}}{\Delta \rho_0}$  | 57.12  | 62.62          | 56.50          | 76.01           | 79.64           | 86.57  | 154.90          |
| $A_0^+ \cdot (\xi_0^+)^3 \cdot \frac{P_c}{k_B \cdot T_c} = 0.0188$  | 0.0135 | 0.0208         | -              | -               | 0.0281          | 0.0191 | 0.0191          |
| $A_0^- \cdot (\xi_0^-)^3 \cdot \frac{P_c}{k_B \cdot T_c} = 0.0360$  | 0.0256 | 0.0233         | -              | -               | 0.0350          | -      | 0.0352          |
| $Y^+ = \frac{\sigma_0}{k_B \cdot T_c} \left( \frac{P_c \cdot A_0^+}{k_B \cdot T_c} \right)^{2/3} = 5.73 \pm 0.16$ | 6.514  | 5.273          | 5.179          | 4.581           | 5.268           | 6.816  | 6.347           |
| $Y^- = \frac{\sigma_0}{k_B \cdot T_c} \left( \frac{P_c \cdot A_0^-}{k_B \cdot T_c} \right)^{2/3} = 3.74 \pm 0.09$ | 4.258  | 4.892          | 4.118          | -               | 4.545           | -      | 4.227           |
| $A_0^+ \cdot \Gamma_0^+ / B_0^+ = 0.0581$   | 0.0365 | 0.0429         | -              | 0.0657          | 0.0596          | 0.0595 | 0.0512          |
| $\Gamma_0^+ / \Gamma_0^- = 4.95$  | 4.874  | 4.700          | -              | 4.880           | 5.532           | -      | 4.894           |
| $U^+ = \frac{\sigma_0 \cdot (\xi_0^+)^2}{k_B \cdot T_c} = 0.37 \pm 0.03$  | 0.370  | 0.398          | -              | -               | 0.487           | 0.486  | 0.454           |
| $S_0 = \frac{\sigma_0}{k_B \cdot T_c} \left( \frac{M}{N_A \cdot \rho_c} \right)^{2/3} = 5.7 \pm 0.2$              | 4.720  | 4.959          | 4.859          | 4.711           | 6.039           | 4.753  | 6.093           |
| $z_B = Y_c^{-\beta} \cdot Z_c^{1/2} \cdot B_0 = 0.468 \pm 0.004$  | 0.565  | 0.565          | 0.567          | 0.561           | 0.560           | -      | 0.510           |
| $z_\sigma = \left( \frac{\sigma_0 \cdot a_c^2}{k_B \cdot T_c} \right) \cdot Y_c^{-\mu} = 1.147 \pm 0.085$         | 1.480  | 1.475          | 1.490          | 1.461           | 1.463           | -      | 1.349           |
| $C_0 = \frac{\sigma_0 \cdot \Gamma^-}{4 \cdot B_0^2 \cdot \xi_0^- \cdot P_c} = 0.114$                             | 0.085  | 0.078          | 0.095          | 0.093           | 0.092           | -      | 0.118           |
| $\omega = \frac{k_B \cdot T_c}{4 \cdot \pi \cdot \sigma_0 \cdot \xi_0^{-2}} = 0.757$                              | 0.594  | 0.637          | 0.571          | 0.638           | 0.629           | -      | 0.632           |

Третій розділ дисертації присвячений експериментально-розрахунковому дослідженню термодинамічних властивостей і критичних параметрів холодоагенту R-245fa, а також його розчинів з компресорним поліетерним маслом Planetelf ACD 100FY. Наведено опис експериментальних установок, що реалізують статичні методи виміру тиску насиченої пари, капілярної сталої (метод капілярного підняття) і пікнометричний метод виміру густини рідини. Описуються методики проведення дослідження фазових рівноваг рідина-рідина, рідина-пара, критичних параметрів, густини, капілярної сталої розчинів холодоагент/мастило (РХМ). У розділі наводяться результати експериментальних досліджень, проведено оцінку похибок виміряних величин. Схема експериментальної установки для комплексного дослідження термодинамічних властивостей холодоагентів зображено на рис. 1.

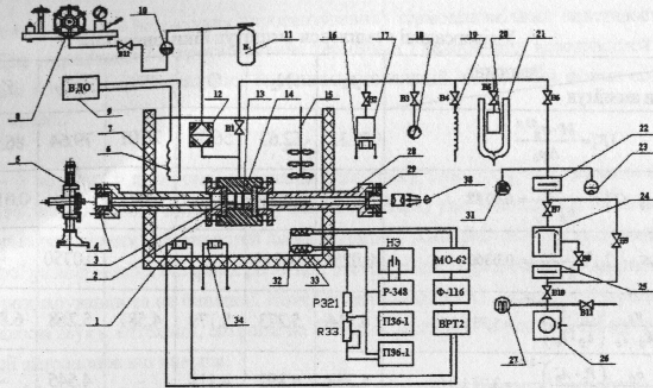


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки для дослідження тиску насиченої пари, густини й капілярної сталості холодоагентів і РХМ:

- 1 – регульований нагрівач; 2, 4 – фланці; 3, 29 – кварцові стекла; 5 – катетометр;
- 6 – теплообмінник; 7 – термостат; 8 – вантажопоршневий манометр (МП-60 і МП-6);
- 9 – водоохолоджувач; 10 – газорідний роздільник; 11 – балон з газом; 12 – мембранний нуль-індикатор; 13 – касета з капілярами; 14 – вимірювальний осередок; 15 – насос-мішалка;
- 16 – нагрівач; 17, 20 – балончики для заправлення й випуску досліджуваних зразків;
- 18 – зразковий манометр; 21 – посудина Дьюара; 22, 25 – криогенний уловлювач;
- 23 – іонізаційний манометр; 24 – дифузійний насос; 26 – форвакуумний насос;
- 27, 31 – термопарний манометричний перетворювач; 28 – оглядові тубуси; 30 – джерело світла; 32 – датчик температури; 33 – зразковий платиновий термометр опору; 34 – розгінний нагрівач.

Вимірювальний осередок 14 виконано у вигляді горизонтального сталевого циліндра з наскрізним отвором діаметром 50 мм. Самоушільнювальні кварцові плоско-паралельні стекла 3, 29 товщиною 15 мм і діаметром 50 мм установлені у фланцях 2, які забезпечують герметичність вимірювального осередку за рахунок фторопластового чепцевого ущільнення з некомпенсованою площею. У середині осередку встановлено касету 13 з п'ятьма каліброваними капілярами різних радіусів:  $r_1=0.1169$  мм,  $r_2=0.0798$  мм,  $r_3=0.0466$  мм,  $r_4=0.0965$  мм,  $r_5=0.3163$  мм.

Для виключення баластових об'ємів вимірювальний осередок 14, мембранний роздільник 12 і «гарячий» вентиль В1 розташовано усередині термостата 7. Чутливість мембранного роздільника не перевищувала 20 Па. Компенсуючий тиск у порожнині над мембраною роздільника створювався азотом з балона 11. Виміри тиску здійснювалися за допомогою вантажопоршневого манометра 8 типу МП-60 класу точності 0.02, а при тисках менше 0.6 МПа – манометра типу МП-6 класу точності 0.02. Всі деталі, що в процесі експерименту мають контакт з досліджуваним зразком, виготовлені зі сталі Х18Н10Т.

У термостаті також розміщені основний 34, регульований 1 нагрівачі й теплообмінник 6, через який циркулює теплоносій від водоохолоджувача 9, що дозволяє проводити досліди при кімнатних температурах. Причому регульований нагрівач 1 установлений у струмені термостатуючої рідини на виході з насоса-мішалки 15. Як термостатуючі рідини використовувалися уайт-спірит і ПМС-100.

Датчиком автоматичної системи регулювання температури був платиновий термометр опору 32,

розташований на виході з насоса-мішалки 15. Проведені дослідження показують, що застосована система термостатування на базі регулятора температури ВРТ-2 забезпечує сталість температури в термостаті з коливаннями не вище  $\pm 0.002$  К. Вимір температури здійснювався десятичним платиновим термометром опору 33 типу ПТС-10 за компенсаційною схемою із застосуванням потенціометра Р-348 класу 0.002 і зразкової котушки опору Р-321 класу 0.01 з похибкою не вище  $\pm 0.02$  К.

Візуальні спостереження за положенням границі розділу фаз і менісків у капілярах здійснювалися за допомогою катетометра 5 (КМ-6), через оглядові тубуси 28. Джерелом світла служила лампа 30 потужністю 60 Вт. Тубуси вакуумувалися для запобігання конденсації вологи на поверхні вікон при роботі установки на низьких температурах.

Вакуумна система експериментальної установки складається з форвакуумного насоса 26, криогенних уловлювачів 22, 25, а також термопарних 27, 31 та іонізаційного 23 вакуумметрів. Система забезпечує підтримку вакууму на рівні  $(3 \dots 5) \cdot 10^{-1}$  Па.

Концентрація досліджуваного розчину холодоагент/мастило, заправленого у вимірювальний осередок, визначалася зважуванням кожного компонента розчину на аналітичних вагах АДВ-200М з похибкою  $5 \cdot 10^{-7}$  кг. Хроматографічний аналіз показав, що після попереднього очищення від газів, що не конденсуються, методом багаторазової кристалізації під вакуумом чистота досліджуваних зразків R-245fa складала 99.99 мас. %.

Критеріями встановлення термодинамічної рівноваги зразка РХМ у вимірювальному осередку були незмінні покази зразкового платиновий термометра опору, сталі тиск і положення менісків рідини в капілярах (нерухомість границі розділу фаз).

З метою визначення розчинності холодоагенту R-245fa у компресорному поліефірному мастилі Planetelf ACD 100FY і температури нормального кипіння РХМ, на експериментальній установці з низькотемпературним термостатом були проведені дослідження кривої розшарування, а також температури кипіння розчину при атмосферному тиску.

Дослідження критичних параметрів холодоагенту R-245fa проводилося за методикою, заснованою на візуальному спостереженні за поведінкою границі розділу фаз.

Виконані дослідження дозволили розширити існуючу базу даних з термодинамічних властивостей холодоагенту R-245fa. Крім того, уперше були отримані експериментальні дані з фазових рівноваг, густини, капілярної сталості, параметрів кривої розшарування й температури нормального кипіння розчинів холодоагенту R-245fa з комерційним компресорним мастилом Planetelf ACD 100FY, а саме:

- отримано інформацію з теплофізичних властивостей мастила Planetelf ACD 100FY у діапазоні температур  $290 \leq T \leq 340$  К;
  - для холодоагенту R-245fa проведено дослідження тиску насиченої пари, густини, капілярної сталості в діапазонах температур  $290 \leq T \leq 424$  К і тисків  $2.6 \leq P \leq 34.5$  бар;
  - виміряно критичні параметри  $T_c$ ,  $P_c$ ,  $\rho_c$  холодоагенту R-245fa;
  - уперше отримано інформацію з фазових рівноваг, густини, капілярної сталості та поверхневого натягу для розчинів холодоагенту R-245fa з поліефірним мастилом Planetelf ACD 100FY у діапазонах температур  $333 \leq T \leq 424$  К і тисків  $3.07 \leq P \leq 32.86$  бар на п'яти заправних концентраціях.
- У проведених дослідженнях температура визначалася з похибкою 0.015 К, тиск – 0.05 %, концентрація рідкої фази розчину – (0.01...0.15) %. Без урахування похибки віднесення й випад-

кової складової похибка визначення густини рідкої фази лежить у межах (0.02...0.10) %, а похибка визначення капілярної сталої не перевищує  $6.5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$ .

Аналітичний опис отриманих експериментальних даних з тиску насиченої пари і густини рідкої фази розчинів R-245fa/Planetelf ACD 100FY виконано в рамках методики, розробленої на кафедрі інженерної теплофізики ОДАХ. Запропоновані кореляції для апроксимації температурних залежностей густини й тиску насиченої пари РХМ мають вигляд:

$$\ln P_{S, \text{max}} = \ln \bar{P}_c(x_R) - \alpha_R(x_R) \cdot \tau - b(x_R) \cdot \tau^{2.64}; \quad (3)$$

$$\ln \rho_{S, l} = \ln \bar{\rho}_c(x_R) + B_l(x_R) \cdot \tau^{\beta \cdot F(\tau)}; \quad (4)$$

$$F(\tau) = 1 - 1.113 \cdot \tau^{0.4} / \ln \tau. \quad (5)$$

Експериментальні дані з капілярної сталої розчинів R-245fa/Planetelf ACD 100FY апроксимовано поліномом;

$$a^2 = [A(T) + B(T) \cdot x_R + C(T) \cdot x_R^2]^2. \quad (6)$$

Концентраційні залежності для псевдокритичних параметрів і коефіцієнтів рівнянь (3)-(6) наведено в дисертації.

З використанням наведених рівнянь були розраховані таблиці довідкових даних на лінії насичення для чистого холодоагенту R-245fa, а також його розчинів з компресорним мастилом Planetelf ACD 100FY.

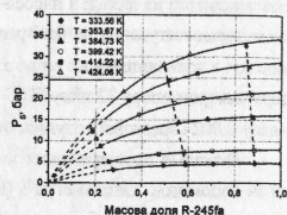
На рис. 2 наведено концентраційні залежності для тиску насиченої пари (а), густини рідкої фази розчину (б), капілярної сталої (в) і поверхневого натягу (г) РХМ R-245fa/Planetelf ACD 100FY.

Отримана інформація про поверхневий натяг на границі рідина-газ дозволила виконати кількісну оцінку адсорбції холодоагенту в поверхневому шарі РХМ. Надлишок R-245fa у поверхневому шарі був розрахований відповідно до рівняння Гіббса:

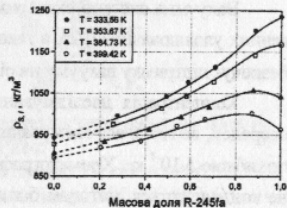
$$G = -\frac{x_R}{R \cdot T} \cdot \left( \frac{\partial \sigma}{\partial x_R} \right). \quad (7)$$

Проведені дослідження показують, що поверхневий шар рідкого РХМ збагачений холодоагентом, що значно впливає на поверхневий натяг і тиск насиченої пари розчинів.

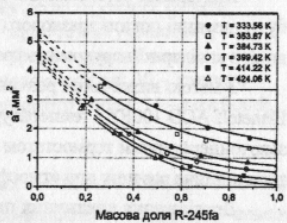
Інформація про тиск насиченої пари розчину R-245fa/Planetelf ACD 100FY дозволила розрахувати ентальпію його рідкої фази. У додатках дисертації наведено докладні таблиці довідкових даних з термодинамічних властивостей розчинів R-245fa/Planetelf ACD 100FY.



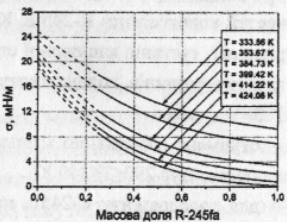
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Концентраційні залежності досліджених термодинамічних функцій розчинів R-245fa/Planetelf ACD 100FY

Четвертий розділ дисертації присвячений розробці діаграм тиск-ентальпія ( $\lg P-h$ ) для реального робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100FY, а також визначенню впливу домішок мастила Planetelf ACD 100FY на роботу компресорної системи високотемпературного теплового насоса, що працює на R-245fa. Показано, що наявність домішок мастила в холодоагенті значно впливає на його термодинамічні властивості, зміщуючи тим самим положення точок холодильного циклу.

Характерною особливістю компресорної системи, що працює на холодоагенті, котрий має властивість взаємно розчинятися з мастилом, є те, що в її контурі циркулює робоче тіло, яке є розчином холодоагент/мастила. Навіть на вході в компресор у робочому тілі обов'язково присутня залишкова рідина, що містить деяку кількість холодоагенту, що не випарувався. Дана обставина позначається на ефективності компресорної системи й умовах функціонування випарника та компресора. Тому при налаштуванні й регулюванні режиму роботи компресорної системи великого значення набуває підтримування параметрів, що впливають як на вміст мастила в РРТ, що залишає випарник, так і на концентрацію холодоагенту, що не випарувався, у залишковій рідині. Із цього погляду одним з найбільш важливих параметрів, що підлягають регулюванню у випарнику, є так званий фіктивний перегрів  $\Delta T$  – позитивна різниця між температурами кипіння РХМ і чистого холодоагенту.

На підставі отриманої експериментальної інформації й з використанням запропонованих у дисертації методів розрахунку термодинамічних властивостей РХМ, розроблено діаграми тиск-ентальпія для реального робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100FY при різних концентраціях мастила перед дросельним пристроєм  $c_g$  (див. рис. 3).

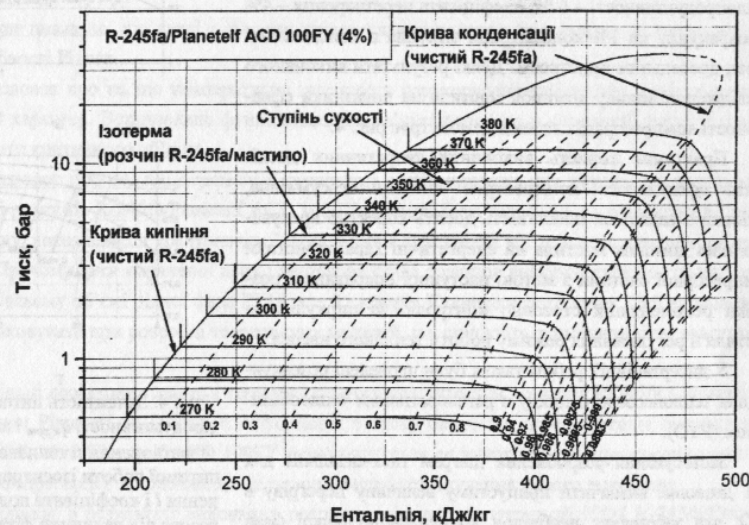


Рис. 3. Діаграма  $\lg P-h$  робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100FY при  $c_g = 4\%$

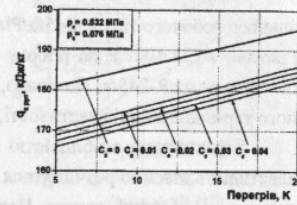
Присутність мастила в холодоагенті завжди зменшує різницю між ентальпією на вході у випарник і виході з нього в порівнянні із чистим холодоагентом, що знаходить своє відображення на змінні як питомої холодовидатності PPT, так і адиабатної роботи стиснення, а, отже, і коефіцієнту перетворення теплового насоса. Проведені нещодавно експериментальні дослідження показують, що при збільшенні фіктивного перегріву зменшується масова витрата холодоагенту, а відтак, і загальна теплопродуктивність теплового насоса. Причому за своїм впливом на теплопродуктивність компресорної системи вибір сорту мастила часом має не менше значення, ніж вибір самого холодоагенту.

Результати виконаних розрахунків деяких показників ефективності компресорної системи теплового насоса, у якому використовується холодоагент R-245fa, вказують на те, що оптимальний фіктивний перегрів для даного робочого тіла становить приблизно (10...12) К. Цей фіктивний перегрів забезпечує ступінь сухості PPT на виході з випарника близько 0.95 при  $c_g = 4\%$ . За даного фіктивного перегріву відносний внесок домішок мастила в змінення роботи ізоентропного стиснення становить близько 5%, питомої теплопродуктивності – 6%, коефіцієнта перетворення – 4% у розрахунку на 1% концентрації мастила в холодоагенті перед дросельним пристроєм. Деякі результати виконаного дослідження впливу домішок мастила на показники ефективності компресорної системи демонструє рис. 4.

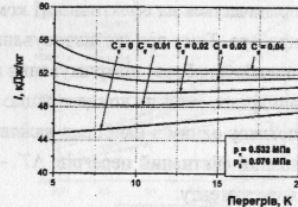
Практична користь виконаних теоретичних досліджень ефективності компресорної системи безсумнівна, оскільки з'являється можливість досить коректно врахувати вплив домішок мастила на енергетичні характеристики компресорної системи з метою наступної оперативної розробки рекомендацій стосовно контролю за циркуляцією мастила й регулювання режиму роботи теплового насоса.

У дисертаційній роботі також були проведені розрахунки для теплонасосного циклу з регенеративним теплообмінником (РТО).

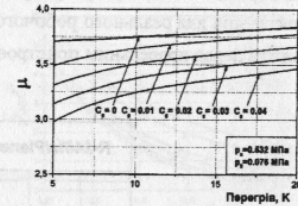
Застосування розроблених діаграм тиск-ентальпія для PPT дозволяє визначити припустиму величину перегріву в РТО, яка забезпечує необхідну концентрацію рідкої фази РХМ для повернення в картер компресора.



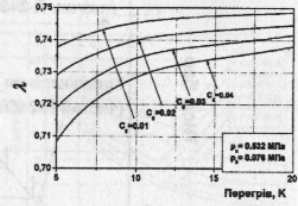
а



б



в



г

Рис. 4. Залежність питомої теплопродуктивності  $q_{k PPT}$  і коефіцієнта перетворення  $\mu$  теплового насоса, питомої роботи ізоентропного стиснення  $I$  і коефіцієнта подачі  $\lambda$  компресора від величини фіктивного перегріву при різних концентраціях мастила у PPT перед дросельним пристроєм  $c_g$

Крім того, застосування РТО забезпечує більш високий ступінь ізотермічності процесів кипіння робочого тіла без втрат енергетичної ефективності, завдяки чому зростає середній температурний напір, що дозволяє зменшити розміри випарника.

## ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертації розроблено базу даних з термодинамічних властивостей перспективного для застосування в новому поколінні теплових насосів та кондиціонерів реального робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100FY. Для досягнення поставленої мети потрібно було вирішити низку взаємозалежних експериментальних і теоретичних завдань. До найбільш важливих наукових і практичних результатів, отриманих у дисертації, можуть бути віднесені:

1. Результати експериментально-розрахункового дослідження фазових рівноваг рідина-рідина, рідина-пара, нормальної температури кипіння, густини й поверхневого натягу розчинів холодоагенту R-245fa з комерційним мастилом Planetelf ACD 100FY.

2. Запропонований у дисертації метод опису термодинамічних властивостей на бінодалі, заснований на принципі двопараметричної універсальності та на принципах скейлінга, дозволяє виконувати прогностичні розрахунки термічних і калоричних властивостей речовин з похибкою, порівнянню з експериментальною. Особливістю методу є застосування універсальних для неасоційованих речовин кросоверних функцій при критичних показниках степеня, що відображає універсальний характер змінення флуктуацій, які, в свою чергу, визначають характер змінення термодинамічних величин.

Уперше показано, що деякі з відомих універсальних комплексів амплітуд залежать від критерію подібності Ріделя.

3. Висновок про те, що температурна залежність парахора неасоційованих речовин має універсальний характер. Встановлено функціональний зв'язок парахора у критичній точці зі значенням питомого критичного об'єму.

4. Висновок про те, що отримані в результаті експериментальних вимірів термодинамічні властивості розчинів R-245fa/Planetelf ACD 100FY повинні бути віднесені до концентрацій рідкої фази розчину, визначених з урахуванням їхньої зміни в залежності від температури досліджуваного зразка. Причому тиск насиченої пари і капілярна стала розчинів визначаються не тільки концентрацією у всьому об'ємі рідкої фази РХМ, але й складом її поверхневого шару. Цей висновок необхідно врахувати при розробці теоретичних моделей, що описують термодинамічні властивості РХМ.

5. Таблиці довідкових даних з термодинамічних властивостей розчинів R-245fa з компресорним мастилом Planetelf ACD 100FY. Інформація з тиску насиченої пари, густини, поверхневого натягу РХМ R-245fa/Planetelf ACD 100FY рекомендується до використання при проектуванні випарників, компресорів і теплообмінників холодильного устаткування нового покоління.

6. Отримані в результаті виконаних розрахунків значення ентальпії РХМ R-245fa/Planetelf ACD 100FY дозволили розробити зручні для практичного застосування діаграми тиск-ентальпія для реального робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100FY з метою коректного урахування впливу

домішок мастила на показники енергетичної ефективності компресорної системи.

7. Практичні рекомендації щодо забезпечення нормальної циркуляції домішок мастила в холодоагенті R-245fa контуром компресорної системи.

### УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ Й ІНДЕКСИ

$Y$  – термодинамічна функція або комплекс амплітуд;  $\psi(t), f(t), F(t)$  – кросверні функції;  $A, B, C$  і  $b$  – коефіцієнти апроксимаційних залежностей;  $A, B$  – амплітуди для ізохорної теплоємності і густини;  $a^2$  – капілярна стала;  $\Gamma$  – ізотермічна стискальність;  $G$  – надлишок легколеткого компонента в поверхневому шарі;  $k_B$  – стала Больцмана;  $l$  – питома робота ізоентропного стиснення;  $M$  – молекулярна маса;  $h$  – ентальпія;  $N_A$  – число Авогадро;  $Z$  – стискальність;  $[P]$  – парахор;  $P$  – тиск;  $q_k$  – питома теплопродуктивність;  $r$  – радіус;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – температура;  $t$  – зведена температура;  $S_0, U, z_B, z_\sigma, C_0, \omega$  – комплекси амплітуд;  $V$  – мольний об'єм;  $x$  – масова доля;  $\alpha_R$  – критерій Ріделя;  $\lambda, \beta$  і  $\mu$  – критичні індекси;  $\lambda$  – коефіцієнт подачі;  $\mu$  – коефіцієнт перетворення;  $\rho$  – густина;  $\Delta\rho$  – різниця ортобаричних густин;  $\xi$  – кореляційна довжина;  $\tau$  – логарифмічна зведена температура;  $\sigma$  – поверхневий натяг;  $c_g$  – концентрація мастила перед дросельним пристроєм.

**Нижні символи:**  $c$  – властивості в критичній точці;  $i$  – рідка фаза;  $mix$  – властивості розчинів холодоагент/мастило;  $s$  – властивості РХМ;  $oil$  – властивості мастила;  $\theta$  – належить критичним амплітудам;  $R$  – властивості чистого холодоагенту;  $ising$  – належить ізінговим значенням;  $i$  – порядковий номер;  $prt$  – реальне робоче тіло.

**Верхні символи:**  $'$  – рідина на лінії насичення;  $''$  – пара на лінії насичення;  $^+$  – належить властивостям при  $T > T_c$ ;  $^-$  – належить властивостям при  $T < T_c$ ;  $^-$  – псевдокритичні параметри.

### ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Железний В.П., Анчербак С.Н., Проценко Д.А. Методи прогнозування властивостей речовин на лінії насичення, включаючи околицю критичної точки // Холодильна техніка і технологія – 2004. – № 5. – С. 5-15.
2. Zhelezny V.P., Skripov P.V., Vozny V.F., Procenko D.A., Ancherbak S.N. Influence of Admixtures of the Compressor Oil to the Enthalpy of Working Fluid in Evaporator // Proc. of the Conference "Compressors-2004". – 2004. – Papiernička (Slovak Republic). – P. 303-309.
3. Железний В.П., Проценко Д.А., Анчербак С.Н., Скрипов П.В. Влияние примесей масла на величину энтальпии рабочего тела в испарителе // Вестник МАХ. – 2004. – № 3. – С.10-15.
4. Железний В.П., Проценко Д.О., Анчербак С.М., Сеченых В.В. Реальне робоче тіло R134a/Castrol Icematic SW22// Холод М+Т. – 2004. – № 6. – С. 15-19.
5. Проценко Д.А., Анчербак С.Н., Железний В.П. Экспериментальное исследование и расчет поверхностного натяжения растворов R134a/Castrol Icematic SW 22 // Холодильна техніка і

технологія. – 2004. – № 6. – С. 39-47.

6. Железний В.П., Султангулов Д.М., Анчербак С.М. Холодоагенти, їхні властивості і застосування // Холод М+Т. – 2005. – №3. – С. 14-20.
7. Анчербак С.Н., Железний В.П., Ниченко С.В. Методи прогнозування калорических властивостей хладагентів і їх розтворів з маслами // Збірник наукових праць „Сучасні проблеми холодильної техніки і технології” (додаток до журналу „Холодильна техніка і технологія”). – Одеса: ОДАХ. – 2005. – С. 86-87.
8. Железний В.П., Цветков О.Н., Анчербак С.Н., Сеченых В.В. Исследования теплофизических свойств новых компрессорных масел // Збірник наукових праць „Сучасні проблеми холодильної техніки і технології” (додаток до журналу „Холодильна техніка і технологія”). – Одеса: ОДАХ. – 2005. – С. 88-89.
9. Железний В.П., Проценко Д.А., Анчербак С.Н., Сеченых В.В. Исследования теплофизических свойств растворов изобутан/ХМИ Азмол // Збірник наукових праць „Сучасні проблеми холодильної техніки і технології” (додаток до журналу „Холодильна техніка і технологія”). – Одеса: ОДАХ. – 2005. – С. 89-90.
10. Железний В.П., Проценко Д.А., Ниченко С.В., Анчербак С.Н. Практические аспекты применения диаграмм давление-энтальпия для реальных рабочих тел // Збірник наукових праць „Сучасні проблеми холодильної техніки і технології” (додаток до журналу „Холодильна техніка і технологія”). – Одеса: ОДАХ. – 2005. – С. 91-92.
11. Железний В.П., Анчербак С.Н., Проценко Д.А., Ниченко С.В. Термодинамически согласованная методика прогнозування термических и калорических свойств веществ на линии насыщения // Материали докладов и сообщений XI Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ. – Санкт-Петербург (Россия). – 4-7 октября 2005. – Т.1. – С. 27.
12. Железний В.П., Проценко Д.А., Анчербак С.Н., Сеченых В.В. Методические особенности экспериментального и расчетного исследования теплофизических свойств маслохладоновых растворов // Материали докладов и сообщений XI Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ. – Санкт-Петербург (Россия). – 4-7 октября 2005. – Т.1. – С.150.
13. Анчербак С.Н., Сеченых В.В., Ищенко В.В., Железний В.П. Экспериментальное исследование теплофизических свойств компрессорных масел: MOGUL ONF 46, Planet ACD 100 FY, ХМИ Азмол, Lunaria FR 32 // Холодильна Техніка і Технологія. – 2005. – № 5. – С. 17-24.
14. Железний В.П., Проценко Д.А., Анчербак С.Н., Сеченых В.В. Экспериментальное исследование термодинамических свойств растворов изобутана в компрессорном масле ХМИ Азмол. Часть I // Холодильна техніка і технологія. – 2005. – № 5. – С. 41-50.
15. Ancherbak S.N., Semenyuk Yu.V., Grebenkov A.J., Beliyeva O.V., Zhelezny V.P. An Experimental Investigation and Modelling of the Thermodynamic Properties of R245fa/Compressor Oil Solutions // Proc. 15<sup>th</sup> Symposium on Thermophysical Properties. – 2006 – Boulder, Colorado (USA). – P. 216-217.
16. Анчербак С.Н., Ниченко С.В., Железний В.П., Семенов Ю.В. Влияние примесей компрессорного масла Planetelf ACD 100 FY на эффективность термодинамического цикла теплового насоса на хладагенте R245fa // 36. наук. праць міжнародної науково-технічної конференції „Промисловий холод і аміак”, 28-30 серпня 2006 р, Одеса, Україна. – С. 57-58.
17. Анчербак С.Н., Семенов Ю.В., Ниченко С.В., Железний В.П., Беляева О.В. Экспери-

ментальное исследование и моделирование термодинамических свойств растворов R245fa/Planetelf ACD 100 FY // 36. наук. праць міжнародної науково-технічної конференції „Промисловий холод і аміак”, 28-30 серпня 2006 р, Одеса, Україна. – С. 58.

18. Семенюк Ю.В., Анчербак С.Н., Железный В.П., Гребеньков А.Ж. Термодинамические свойства хладагента R245fa на линии насыщения // 36. наук. праць міжнародної науково-технічної конференції „Промисловий холод і аміак”, 28-30 серпня 2006 р, Одеса, Україна. – С. 89-90.

19. Ancherbak S.N., Semenyuk Yu.V., Skripov P.V., Zhelezny V.P. An Experimental Investigation and Modelling of the Thermodynamic Properties of R245fa/Compressor Oil Solutions // Proc. of the Conference “Compressors-2006”. – Papiernička (Slovak Republic). – 2006. – P. 374-382.

20. Zhelezny V.P., Vozniy V.F., Semenyuk Yu.V., Nichenko S.V., Ancherbak S.N. Influence of Compressor Oil Admixtures on Thermodynamic Efficiency of Compressor System // Proc. of the Conference “Compressors-2006”. – Papiernička (Slovak Republic). – 2006. – P. 367-373.

21. Семенюк Ю.В., Анчербак С.Н., Железный В.П., Сеченых В.В. Экспериментальное исследование и моделирование термодинамических свойств растворов R245fa/компрессорное масло Planetelf ACD 100FY // Холодильная техника и технология. – 2006. – № 5. – С. 23-32.

22. Семенюк Ю.В., Анчербак С.Н., Железный В.П., Гребеньков А.Ж., Беляева О.В. Теоретическое исследование влияния примесей масла в хладагенте R245fa на эффективность работы теплового насоса // Холодильная техника. – 2006. – № 10. – С. 44-47.

23. Семенюк Ю.В., Анчербак С.Н., Железный В.П., Гребеньков А.Ж., Беляева О.В. Исследование давления насыщенных паров, плотности, поверхностного натяжения и критических параметров хладагента R245fa // Вестник МАХ. – 2006. – № 4. – С. 20-26.

24. Zhelezny P.V., Prochenko D.A., Zhelezny V.P., Ancherbak S.N. An experimental investigation and modelling of the thermodynamic properties of isobutane-compressor oil solutions: Some aspects of experimental methodology // Int. J. Refrig. – 2007. – № 30. – P. 433-445.

25. Железный В.П., Сеченых В.В., Семенюк Ю.В., Анчербак С.Н., Цветков О.Н. Экспериментальное исследование теплофизических свойств компрессорных масел: MOGUL ONF 46, Planetelf ACD 100FY, ХМИ АЗМОЛ, Lunaria FR 32, XC 15, XC 40 // Вестник МАХ. – 2007. – № 2. – С.23-30.

26. Zhelezny V.P., Semenyuk Yu.V., Ancherbak S.N., Grebenkov A.J., Beliyeva O.V. An experimental investigation and modelling of the solubility, density and surface tension of 1,1,1,3,3-pentafluoropropane (R-245fa)/synthetic polyolester compressor oil solutions // J. Fluor. Chem. – 2007. – № 128. – P. 1029-1038.

Особистим внеском автора в роботах, виконаних у співавторстві є: [1, 7, 11] – розвиток методів прогнозування термічних і калоричних властивостей речовин, розрахунки за моделями, зіставлення літературних даних і результатів розрахунку, підготовка матеріалів для публікацій і презентацій, доповіді на конференціях і участь у дискусіях; [2, 3, 4, 10, 16, 22] – участь у розрахункових дослідженнях, підготовка матеріалів для публікацій і презентацій; [5, 8, 9, 12-15, 17-21, 23-26] – участь в експериментальному дослідженні, обробка експериментальних даних, розрахунки за моделями, зіставлення експериментальних даних і результатів розрахунку, підготовка матеріалів для публікацій і презентацій, доповіді на конференціях і участь у дискусіях; [6] – підготовка матеріалів для публікації.

## АНОТАЦІЯ

**Анчербак С.М. Термодинамічні властивості розчинів холодоагенту R-245fa з компресорним поліефірним мастилом (Експеримент, методи прогнозування) – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». – Одеська державна академія холоду, Одеса, 2007 г.

Дисертація присвячена комплексному експериментально-розрахунковому вивченню фазових рівноваг, термодинамічних властивостей на лінії насичення розчинів холодоагенту R-245fa з поліефірним компресорним мастилом Planetelf ACD 100FY, розробці з використанням отриманої інформації таблиць довідкових даних з термічних і калоричних властивостей для реального робочого тіла R-245fa/компресорне мастило Planetelf ACD 100FY, а також дослідженню впливу домішок мастила на показники енергетичної ефективності компресорної системи.

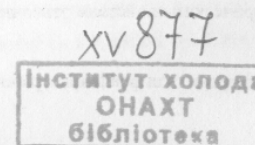
Для виконання поставлених у дисертації завдань створено оригінальну експериментальну установку, на якій проведено комплексні дослідження термодинамічних властивостей розчинів холодоагент/мастило (РХМ), включаючи: фазові рівноваги, критичні параметри, поверхневий натяг і густину чистого холодоагенту R-245fa та його розчинів с мастилом Planetelf ACD 100FY.

В роботі отримала подальший розвиток термодинамічно узгоджена методика прогнозування термічних і калоричних властивостей речовин, що реалізує основні принципи скейлінга. В рамках методики коефіцієнти степеневих кореляцій пов'язані між собою універсальними співвідношеннями, а ефективні показники степеня при зведеній температурі змінюються універсально для неасоційованих речовин.

З використанням отриманих експериментальних даних розроблено діаграми тиск-ентальпії та розраховано таблиці довідкових даних з термічних і калоричних властивостей для реального робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100 FY.

Вперше для реального робочого тіла R-245fa/Planetelf ACD 100 FY виконано теоретичне дослідження впливу домішок мастила в холодоагенті на показники ефективності теплонасосного циклу.

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



## АННОТАЦИЯ

**Анчербак С.Н. Термодинамические свойства растворов хладагента R-245fa с компрессорным полиэфирным маслом (Эксперимент, методы прогнозирования) – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика». – Одесская государственная академия холода, Одесса, 2007 г.

Диссертация посвящена комплексному экспериментально-расчетному изучению фазовых равновесий, термодинамических свойств на линии насыщения растворов хладагента R-245fa в полиэфирном компрессорном масле Planetelf ACD 100FY, разработке с использованием полученной информации таблиц справочных данных по термическим и калорическим свойствам для реального рабочего тела R-245fa/компрессорное масло Planetelf ACD 100FY, а также исследованию влияния примесей масла на показатели энергетической эффективности компрессорной системы.

Для осуществления поставленных в диссертации задач создана оригинальная экспериментальная установка и проведены комплексные исследования термодинамических свойств растворов хладагент/масло (РХМ), включая: фазовые равновесия, критические параметры, поверхностное натяжение, плотность чистого хладагента R-245fa и его растворов с маслом Planetelf ACD 100FY.

В работе получена дальнейшее развитие термодинамически согласованная методика прогнозирования термических и калорических свойств веществ, реализующая основные принципы скейлинга, в рамках которой коэффициенты степенных корреляций связаны между собой универсальными термодинамическими соотношениями, а эффективные показатели степени при приведенной температуре изменяются универсально для неассоциированных веществ. Предложены новые корреляции для аппроксимации и прогнозирования кривой расслоения бинарных растворов, диэлектрической проницаемости и показателя преломления на кривой расслоения, показателя преломления, изотермической сжимаемости, изохорной и изобарной теплоемкости, скорости звука, энтальпии, энтропии на пограничных кривых жидкости и пара, изохорной теплоемкости на критической изохоре.

С использованием полученных экспериментальных данных в рамках предложенных в диссертации корреляций рассчитана энтальпия жидкой фазы РХМ, разработаны диаграммы давление-энтальпия для реального рабочего тела R-245fa/Planetelf ACD 100 FY. В приложении диссертации представлены впервые полученные экспериментальные данные по термодинамическим свойствам растворов R-245fa/Planetelf ACD 100FY, приведены таблицы справочных данных по термическим и калорическим свойствам этого перспективного для применения в тепловых насосах рабочего тела.

Впервые для реального рабочего тела R-245fa/Planetelf ACD 100FY выполнено теоретиче-

ское исследование влияния примесей масла в хладагенте на показатели эффективности теплонасосного цикла. Показано, что присутствие примесей масла в хладагенте приводит к значительному снижению теплопроизводительности и коэффициента преобразования, исследовано влияние концентрации масла в хладагенте перед дроссельным устройством, а также величины перегрева рабочего тела в испарителе на показатели 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-245fa по контуру компрессорной системы. В результате проведенного исследования показано, что применение регенеративного теплообменника при использовании в теплонасосном оборудовании хладагента R-245fa позволяет в значительной мере снизить негативное наличие 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.

## ABSTRACT

**Ancherbak S.N. Thermodynamic properties of the solutions refrigerant R-245fa with compressor polyester oil (Experiment and methods of prediction) – 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, 2007.

The dissertation is dedicated to experimental investigation of phase equilibrium, thermodynamic properties on a saturation line for solutions of refrigerant R-245fa with compressor oil Planetelf ACD 100FY. Based on result obtained tables of the reference data and pressure-enthalpy diagrams for a real working fluid R-245fa/compressor oil Planetelf ACD 100FY are developed and calculated, presented. An influence of the compressor oil admixtures to performance of a compressor system is examined. The experimental set-up for complex investigations of the thermodynamic properties such as phase equilibrium, critical parameters, surface tension, density of the refrigerants and refrigerant-oil solutions (ROS) has been designed.

The method of prediction of the thermodynamic properties on a saturation line based on scaling principle for the refrigerants and ROS have been developed. New correlations for a critical solubility curve for binary solutions, dielectric permeability and refractive index on the critical solubility curve, re-

fractive index, isothermal compressibility, isochoric and isobaric heat capacity, speed sound, enthalpy, entropy on a boundary curve, isochoric heat capacity on a critical isochore are reported.

The influence of compressor oil admixtures to efficiency of a heat pump compressor system is investigated.

Based on performed calculation it was shown that an application of the regenerative heat exchanger in the heat pump using R-245fa makes it possible to reduce negative presence the compressor oil admixtures in an evaporator and increases energy efficiency of thermodynamic cycle of compressor system.

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

*C. Heey*