

Автореферат
М21

М

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

МАЛЬЧЕВСЬКИЙ ВАЛЕНТИН ПАВЛОВИЧ



УДК 536.7.004 (043.3)

**ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СУМІШЕЙ ОЗОНОБЕЗПЕЧНИХ ТА
ПРИРОДНИХ ХОЛОДОАГЕНТІВ**

Спеціальність 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2008

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Одеському національному морському університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор
Вассерман Олександр Анатолійович,
Одеський національний морський університет,
професор кафедри суднових енергетичних установок
і технічної експлуатації

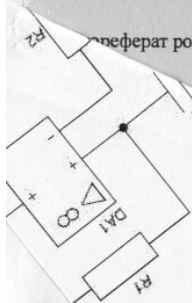
Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Железний Віталій Петрович,
Одеська державна академія холоду,
професор кафедри інженерної теплофізики

кандидат фізико-математичних наук
Бардік Віталій Юрійович,
Київський національний університет ім. Т. Г. Шевченка,
науковий співробітник кафедри молекулярної фізики

Захист дисертації відбудеться «14» квітня 2008 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.41.087.01 в Одеській державній академії холоду за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65026, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ОДАХ за адресою:
вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65026, Україна.

Реферат розісланий «6» березня 2008 р.



Мілованов В.І.

xv1267
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
бібліотека

1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За останні двадцять років суттєво розширилося коло робочих речовин, які використовуються у холодильній техніці. У значній мірі це обумовлено підписанням Монреальського (1987) і Кіотського (1997) Протоколів, у відповідності з якими припинено виробництво холодоагентів, що руйнують озоновий шар Землі, а також обмежені у використанні альтернативні холодоагенти з високим потенціалом глобального потепління.

При виборі робочих тіл для холодильних установок треба приймати до уваги еколого-енергетичну ефективність холодильного обладнання. Серед альтернативних холодоагентів перспективними є суміші озонобезпечних та природних холодоагентів R125/R290, R134a/R290, R23/R744, R41/R744. Для оцінки енергетичної ефективності вказаних сумішей необхідно мати надійні дані про їх термодинамічні властивості у характерних точках циклів холодильних установок. Як відомо, раціональним способом отримання таких даних є їх розрахунок за допомогою рівняння стану, що складене на базі експериментальних даних про термодинамічні властивості сумішей. На жаль, рівняння стану і таблиці термодинамічних властивостей цих сумішей поки що відсутні, тому їх складання є актуальним.

У дослідження термодинамічних властивостей сумішей холодоагентів внесли великий вклад: Ваганабе К. (Watanabe K.), Геллер В. З., Гребеньков А. Ж., Железний В. П., Йокозеки А. (Yokozeki A.), Клейбер М. (Kleiber M.), Лавренченко Г. К., Леммон Е. (Lemmon E.), Мазур В. О., Маклінден М. (McLinden M.), Мейдж Дж. (Magee J.), Цветков О. Б. Однак появлення нових експериментальних даних про властивості таких сумішей робить доцільним подальше дослідження у цій області.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до: Постанов Кабінету Міністрів України № 624 від 16.05.2002 р. «Про посилення державного регулювання ввозу і вивозу з України озоноруйнівних речовин» і № 256 від 04.03.2004 р. «Про затвердження Програми припинення в Україні виробництва та використання озоноруйнівних речовин на 2004 – 2030 роки»; Державної програми розвитку еталонної бази на 2006 – 2010 рр. (Розділ 3. Дані про термодинамічні властивості технічно важливих газів і рідин), затвердженої постановою КМ України № 228 від 01.03.2006 р., плану науково-дослідних робіт Одеського національного морського університету на 2006 – 2008 рр. за темою: «Розробка теоретичної бази системи моніторингу і діагностики робочого процесу суднових дизелів», № 0106U001268 (розділ «Перспективи використання системи моніторингу для діагностики компресорів холодильних установок з використанням рівнянь стану робочих речовин»).

Мета дослідження. Виходячи з вищесказаного, метою дисертаційного дослідження є складання на підставі експериментальних даних про термодинамічні властивості надійних рівнянь стану для сумішей холодоагентів R125/R290, R134a/R290, R23/R744, R41/R744, розрахунок на їх основі таблиць термодинамічних властивостей цих речовин, а також створення автоматизованої інформаційної системи для розрахунку теплофізичних властивостей досліджуваних чотирьох сумішей та інших природних і альтернативних холодоагентів.

Об'єктом дослідження у даній роботі є дослідження термодинамічних властивостей сумішей озонобезпечних та природних холодоагентів.

Предметом дослідження є термодинамічні властивості сумішей R125/R290, R134a/R290, R23/R744, R41/R744; методи розрахунку термодинамічних властивостей сумішей.

Методом дослідження є аналітичний опис експериментальних даних за допомогою рівняння стану та використання диференційних співвідношень термодинаміки з урахуванням особливостей термодинамічної поведінки сумішей для одержання на підставі цього рівняння інформації про комплекс термодинамічних властивостей сумішей.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні **основні задачі**: зроблено аналіз стану експериментальних досліджень термодинамічних властивостей сумішей R125/R290, R134a/R290, R23/R744, R41/R744; проаналізовані найбільш поширені методи розрахунку термодинамічних властивостей сумішей холодоагентів та вибрано з цих методів оптимальний для вказаних чотирьох сумішей; досліджена можливість складання надійного рівняння стану для сумішей холодоагентів на підставі обмеженої кількості експериментальних даних; на базі наявних експериментальних даних складені рівняння стану для сумішей R125/R290, R134a/R290, R23/R744, R41/R744 та за допомогою цих рівнянь розраховані таблиці термодинамічних властивостей у необхідному для холодильної техніки діапазоні температури і тиску; проведено аналіз термодинамічної поведінки вказаних сумішей у стані фазової рівноваги та аналіз циклу одноступеневої холодильної установки при використанні у якості робочих речовин цих чотирьох сумішей; зроблена оцінка вкладу від функції взаємодії компонентів суміші у питомий об'єм, ентальпію і ентропію для досліджуваних у роботі сумішей при розрахунку цих властивостей за одержаними рівняннями стану; створена автоматизована система для розрахунку теплофізичних властивостей холодоагентів.

Наукова повизна одержаних результатів. В роботі вперше зроблено дослідження точності рівняння стану суміші при поступовому зменшенні кількості експериментальних даних, що використовуються при складанні цього рівняння; вперше за наявними експериментальними p, ρ, T, x -даними та одержаними додатково в межах даної роботи опорними даними для густини насичених пари та рідини складені рівняння стану сумішей холодоагентів R125/R290, R134a/R290, R23/R744, R41/R744; вперше за допомогою отриманих рівнянь стану для вказаних чотирьох сумішей досліджені особливості їх термодинамічної поведінки у стані фазової рівноваги, а також оцінена енергетична ефективність циклу одноступеневої холодильної установки на базі цих речовин; зроблена оцінка вкладу, який вносить функція взаємодії компонентів суміші у значення термічних і калоричних властивостей; розраховані таблиці термодинамічних властивостей досліджуваних сумішей для однофазної області та стану насичення;

За результатами виконаних досліджень сформульовані **наукові положення**:

1. Кількість експериментальних даних, які використовуються при складанні рівняння стану суміші, може бути значно скорочена без суттєвого зменшення точності цього рівняння при умові збереження діапазону параметрів вихідного масиву даних;

2. Внесок від функції взаємодії компонентів суміші у значення її термодинамічних властивостей у області приведених температур 0,8 – 1,2 досить невеликий, тому використання надійних рівнянь стану для компонентів при складанні рівняння стану суміші у вказаній області температур у найбільшій мірі визначає надійність цього рівняння;

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та результатів проведених у роботі досліджень підтверджується використанням сучасних аналітичних методів статистичної обробки значень термодинамічних властивостей сумішей, ретельним зіставленням даних, розрахованих за складеними рівняннями стану сумішей, з експериментальними даними, розрахунками, які були зроблені для оцінювання можливості складання рівняння стану для суміші на підставі обмеженої кількості даних і для визначення вкладу від функції взаємодії у значення термодинамічних властивостей сумішей.

Наукове значення мають наступні результати дослідження:

- отримані рівняння стану сумішей R125/R290, R134a/R290, R23/R744, R41/R744;
- виявлені у результаті зробленого аналізу особливості термодинамічної поведінки досліджуваних сумішей у стані фазової рівноваги;
- розраховані таблиці густини, ентальпії та ентропії сумішей R125/R290, R134a/R290, R23/R744 і R41/R744 у однофазній області і у стані фазової рівноваги;
- досліджені закономірності поведінки функції взаємодії компонентів суміші у залежності від її складу.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що отримані у дисертації рівняння стану і таблиці термодинамічних властивостей сумішей озонобезпечних та природних холодоагентів кладуть початок створення надійних довідкових даних для вказаних сумішей. Ці дані необхідні для проектування холодильного обладнання. Розроблена автоматизована інформаційна система дозволяє розраховувати термодинамічні властивості холодоагентів та їх сумішей при заданих значеннях температури та тиску для різних комбінацій незалежних змінних.

Автоматизована система для розрахунку теплофізичних властивостей природних і альтернативних холодоагентів, рівняння стану і таблиці термодинамічних властивостей чотирьох сумішей впроваджені у державному підприємстві «Термодинамічний центр» Мінпаливенерго України (м. Київ) і в Українській асоціації виробників технічних газів (м. Одеса) для використання у наукових дослідженнях, ВАТ «Рефма» (м. Мелітополь) для проектування холодильного обладнання, Національному університеті кораблебудування ім. адмірала Макарова (м. Миколаїв) та Одеській національній морській академії для використання у наукових дослідженнях і у навчальному процесі. Документи, що підтверджують впровадження результатів дослідження, наведені у додатку А до дисертації.

Особистий внесок здобувача. При виконанні дисертаційного дослідження використані ідеї та рекомендації наукового керівника з проблеми складання рівнянь стану сумішей холодоагентів та розрахунку їх термодинамічних властивостей. Особисто здобувачем виконані: збір та аналіз експериментальних даних для сумішей R125/R290, R134a/R290, R23/R744, R41/R744; розрахун-

ки, пов'язані з дослідженням можливості складання надійного рівняння стану для сумішей холодоагентів на базі обмеженої кількості експериментальних даних; розробка комп'ютерної програми і складання на її основі рівнянь стану для досліджуваних сумішей; аналіз термодинамічної поведінки сумішей у стані фазової рівноваги; розрахунок за допомогою отриманих рівнянь стану таблиць термодинамічних властивостей для сумішей R125/R290, R134a/R290, R23/R744, R41/R744; дослідження вкладу від функції взаємодії компонентів суміші у значення термодинамічних властивостей досліджуваних сумішей; аналіз ефективності циклу одноступеневої холодильної установки на базі вказаних сумішей; розробка інтерфейсу та більшої частини програмних модулів для автоматизованої інформаційної системи для розрахунку теплофізичних властивостей холодоагентів.

Апробація роботи. Основні результати доповідалися та обговорювалися на: 5-му Міжнародному семінарі «Підвищення ефективності та безпеки установок для розділення повітря» (м. Одеса, Україна, 2004 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Холодильна техніка і продовольча безпека» (м. Одеса, Україна, 2004 р.), 4-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології» (м. Одеса, 2005 р.), 17-й Європейській конференції з теплофізичних властивостей (м. Братислава, Словаччина, 2005 р.), XI Російській конференції з теплофізичних властивостей речовин (м. Санкт-Петербург, Росія, 2005 р.), 16-му симпозиумі з теплофізичних властивостей (м. Боулдер, США, 2006 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Промисловий холод і аміак» (м. Одеса, 2006 р.); щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу та наукових співробітників Одеського національного морського університету у 2003 – 2007 роках.

Публікації. Основний зміст дисертації представлено у 7 публікаціях в наукових журналах, які відповідають вимогам ВАК України, а також у 7 тезах доповідей у збірниках праць міжнародних та регіональних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і п'яти додатків, у яких наведені акти про впровадження результатів роботи, таблиці термодинамічних властивостей сумішей R125/R290, R134a/R290, R23/R744, R41/R744 і таблиці відхилень значень термодинамічних властивостей вказаних сумішей, отриманих за допомогою системи REFPROP, від розрахованих за рівняннями стану. Загальний обсяг роботи – 170 сторінок, включаючи 44 рисунки, 25 таблиць і 157 найменувань джерел. Обсяг додатків – 86 сторінок.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовані актуальність теми дисертації, показаний її зв'язок з існуючими науковими програмами і темами. Сформульовано мету та задачі дослідження. Розглянуті наукова новизна одержаних результатів і наукові положення, що підлягають захисту. Наведені дані про практичне значення результатів, особистий внесок здобувача, апробацію роботи та публікації.

Перший розділ присвячений аналізу стану досліджень термодинамічних властивостей сумішей озонобезпечних і природних холодоагентів та найбільш поширених методів розрахунку

цих властивостей. Суміші гідрофторвуглеців та природних холодоагентів сполучають позитивні властивості кожного з компонентів і є перспективними робочими речовинами холодильних установок. Дослідження термодинамічних властивостей таких сумішей тільки почалися, тому експериментальні дані про їх калоричні властивості відсутні. Рівняння стану для цих сумішей не склалися і таблиці термодинамічних властивостей також не розраховувалися.

Аналіз дослідних даних про термічні властивості сумішей озонобезпечних і природних холодоагентів дозволив встановити, що найбільш дослідженими з них є суміші: R125/R290, R134a/R290, R23/R744 і R41/R744. Виконаний огляд методів розрахунку термодинамічних властивостей сумішей показує, що для вибраних сумішей оптимальною є методика Леммона.

Другий розділ присвячений складанню на базі наявних експериментальних даних рівнянь стану для сумішей R125/R290 і R134a/R290 і отриманню за їх допомогою таблиць густини, ентальпії та ентальпії. Масив експериментальних даних для вказаних сумішей досить обмежений. Для дослідження можливості складання надійного рівняння стану нами була розроблена комп'ютерна програма, за якою на базі покрокового регресійного аналізу з використанням малої кількості опорних даних складено три серії рівнянь стану добре дослідженої суміші R32/R125 з поступовим зменшенням кількості опорних даних у кожній серії і зроблений опис повного масиву даних отриманими рівняннями. Для складання рівнянь використано 2363 дослідних значення густини з п'ятнадцяти джерел для однофазної області у інтервалах $200 + 440 \text{ K}$ і $0,02 + 39 \text{ МПа}$ для 19 складів суміші, а також величини густини та тиску співіснуючих парової та рідинної фаз для 31 значення температури у діапазоні від 180 до 330 K для чотирьох складів. Для перевірки точності рівнянь також використано 401 дослідну величину ізохорної теплоємності.

Для складання рівнянь стану використана методика Леммона, відповідно до якої рівняння стану суміші має форму:

$$\alpha_{\text{mix}}(\omega, \vartheta, x) = \alpha^{\text{dmix}}(\omega, \vartheta, x) + \alpha^{\text{E}}(\omega, \vartheta, x). \quad (1)$$

Функція взаємодії α^{E} записується у наступному вигляді:

$$\frac{A^{\text{E}}}{RT} = \alpha^{\text{E}}(\omega, \vartheta, x) = x_1 x_2 \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^r a_{ij} \omega^i \vartheta^j + \exp(-\omega^2) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s b_{ij} \omega^i \vartheta^j \right]. \quad (2)$$

При складанні першої серії рівнянь були послідовно виключені дані з найбільшими відхиленнями по густині, а при складанні другої та третьої серій – більшість даних з найменшими відхиленнями. У процесі зменшення кількості опорних даних область параметрів, яка охоплена цими даними залишалася незмінною.

Узагальнені результати розрахунків наведені на рисунку 1. На осі x графіка відкладено кількість даних N , які використані для складання трьох серій рівнянь стану, а на осі y відкладено величини середніх квадратичних відхилень по густині $\delta\rho$ та ізохорній теплоємності δc_v .

Як можна бачити з рисунку, для всіх серій рівнянь відхилення $\delta\rho$ та δc_v практично не змінюються при зменшенні кількості даних N і лише на останньому кроці помітно підвищуються. Проведені розрахунки показали можливість суттєвого зменшення кількості опорних даних при

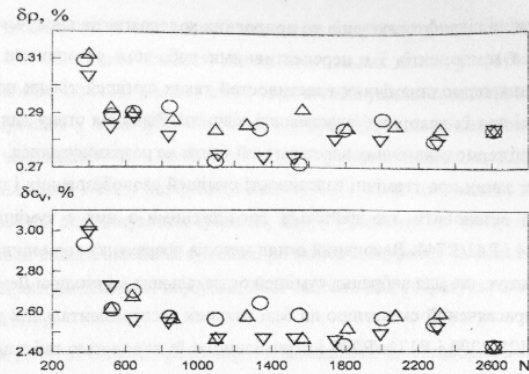


Рис. 1. Середні квадратичні відхилення експериментальних величин густини та ізохорної теплоємності від розрахованих при різній кількості даних N , використаних при складанні рівнянь стану: Δ – серія 1, ∇ – серія 2, $\bigcirc$ – серія 3

Таблиця 1. Перелік p, ρ, T, x -даних, які були використані при складанні рівнянь стану сумішей R125/R290 і R134a/R290, задані погрішності даних δp , використані для розрахунку ваги цих даних, та середні квадратичні відхилення $\delta \rho_m$ вихідних значень густини від розрахованих

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів	δp , (%)	$\delta \rho_m$, (%)		
R125/R290 – p, ρ , T, x - дані							
2000	Каюкава	151	305–380	0,16–4,50	0,29–0,75	0,05	0,25
2002	Йокояма	213	298–423	0,10–6,70	0,50–0,75	0,1	0,27
R125/R290 – крива насичення (p, T, x - дані)							
1997	Холькомб, ρ''	32	280–340	0,59–3,47	0,15–0,77	0,15	0,26
2003	Кім, ρ''	101	253–323	0,24–2,87	0,03–0,90	0,15	0,13
2002	Боббо, ρ''	49	258–303	0,29–1,82	0,02–0,96	0,15	0,11
1997	Холькомб, ρ'	32	280–348	0,59–4,18	0,15–0,77	0,05	0,06
2003	Кім, ρ'	101	253–323	0,24–2,87	0,03–0,90	0,05	0,04
2002	Боббо, ρ'	49	258–303	0,29–1,82	0,02–0,96	0,05	0,07
2005	Дані про ρ'' і ρ' при $x = y$	54	253–348	0,33–3,41	0,10–0,82	0,15	0,09
2005	Перегрітий пар, ρ для заданих p	89	258–295	0,50–1,00	0,10–0,93	0,15	0,05
R134a/R290 – p, ρ , T, x - дані							
2000	Наганума [12]	61	320–400	1,76–6,13	0,25–0,78	0,1	0,14
R134a/R290 – крива насичення (p, T, x - дані)							

1994	Клейбер, ρ''	23	255–298	0,24–1,18	0,24–0,67	0,10	0,08
1997	Холькомб, ρ''	41	280–355	0,44–3,06	0,13–0,96	0,10	0,10
1994	Клейбер, ρ'	21	255–298	0,29–1,18	0,14–0,93	0,05	0,03
1997	Холькомб, ρ'	42	279–356	0,44–3,42	0,07–0,98	0,05	0,08
1998	Стріск, ρ'	14	283	0,68–0,80	0,03–0,81	0,05	0,03
2005	Дані про ρ'' для ρ'' при $x = y$	56	255–355	0,24–2,85	0,14–0,96	0,10	0,09
2005	Перегріта пара, ρ для заданих p	66	255–311	0,10–1,45	0,04–0,84	0,10	0,04

складанні рівняння стану суміші холодоагентів без значного погіршення точності рівняння.

Кількість експериментальних даних для сумішей R125/R290 і R134a/R290, а також їх діапазон за температурою, тиском та мольною концентрацією наведені у таблиці 1. У цій таблиці також вказані розраховані нами опорні дані (54 і 89 точок).

Відсутні експериментальні дані про густину насиченої пари, а також про густину пари при низьких температурах отримані шляхом розрахунку за двома додатковими рівняннями, що отримані на базі експериментальних даних про густину пари. Розраховані за двома рівняннями значення густини, відрізнялися між собою на 0,05 ÷ 0,46 % і для включення у масив опорних даних для складання рівняння стану суміші були осереднені.

Для отримання даних про густину насиченої рідини, які також відсутні, для однакових значень приведеної температури $\tau = T/T_{cr}$, що лежать у інтервалі, охопленому експериментом по суміші, були розраховані та зіставлені між собою відповідні значення приведенного питомого об'єму $\phi' = v'/v_{cr}$ компонентів сумішей і встановлено, що вони відрізняються не більше, ніж на 3,6 %. Тому для експериментальних значень температури та складу сумішей відповідні їм значення ϕ' суміші були розраховані як адитивні величини.

При складанні рівнянь стану використано рівняння Вассермана і Фомінського для R125, рівняння Тільнер-Рота для R134a і рівняння Сичова і Вассермана для R290. Максимальні значення відносної похибки за густиною $\delta \rho$, які були використані при складанні рівнянь стану також наведені у таблиці 1.

Для правильного опису теплоти фазового переходу за допомогою рівняння стану при його складанні урахувувалася умова рівності площ під реальною та розрахованою ізотермами суміші постійного складу в інтервалі від v' до v'' . Після складання рівняння експериментальні значення тиску насиченої пари та рідини були зіставлені з розрахованими значеннями при виконанні строгої умови фазової рівноваги, яке представлено у вигляді рівності парціальних летучостей компонентів суміші у рідкій та паровій фазах.

Значення коефіцієнтів a_{ij} і b_{ij} функції взаємодії (2) для сумішей R125/R290 і R134a/R290 наведені у таблиці 2.

Середні квадратичні відхилення $\delta \rho_m$ вихідних значень ρ від розрахованих за рівнянням ста-

Таблиця 2. Коефіцієнти a_{ij} та b_{ij} функції взаємодії (2) сумішей R125/R290 і R134a/R290

R125/R290				R134a/R290			
i	j	a_{ij}	b_{ij}	i	j	a_{ij}	b_{ij}
1	0	$5,9638414 \cdot 10^{-1}$	$1,2135175 \cdot 10^0$	1	3	$7,44692395 \cdot 10^{-1}$	$-2,46403707 \cdot 10^0$
1	4	$-9,8156854 \cdot 10^{-1}$	$4,8504378 \cdot 10^{-1}$	1	5	$-1,30015215 \cdot 10^{-1}$	$1,42046848 \cdot 10^0$
1	6	$-3,4632821 \cdot 10^{-1}$	$-3,1246327 \cdot 10^{-1}$	2	1	$-1,12057011 \cdot 10^{-1}$	$2,71516524 \cdot 10^0$
2	1	$-1,2647688 \cdot 10^0$	$1,1651920 \cdot 10^0$	5	2	$-2,29507807 \cdot 10^{-3}$	$-2,77196367 \cdot 10^0$
2	4	$1,3216663 \cdot 10^0$	$8,2924395 \cdot 10^{-1}$	b_{ij}		7	$1,692805567 \cdot 10^{-1}$
3	0	$2,8951690 \cdot 10^{-1}$	$-5,4920215 \cdot 10^{-1}$	1	5	$-1,82792216 \cdot 10^{-1}$	$-1,63864283 \cdot 10^{-2}$
3	4	$-1,8322027 \cdot 10^{-1}$	$5,7363570 \cdot 10^{-2}$	2	5	$5,77442555 \cdot 10^{-1}$	

ну для обох сумішей наведені у таблиці 1. Середні квадратичні відхилення експериментальних значень тиску та опорних значень густини насичених пари і рідини від розрахованих за рівнянням стану для суміші R125/R290 при виконанні строгої умови фазової рівноваги дорівнюють: 0,93 та 1,08 % для p'' та p' і 1,49 та 0,06 % для p'' і p' , а для суміші R134a/R290: 1,12 і 1,49 % для p'' та p' та 1,60 і 0,08 % для p'' і p' .

Відхилення експериментальних і опорних значень густини, використаних при складанні рівнянь стану від розрахованих за цими рівняннями для сумішей R125/R290 (для 925 точок, з яких 364 експериментальних та 561 опорна) і R134a/R290 (для 380 точок, з яких 61 експериментальна та 319 опорних) зображені на рисунку 2 у вигляді гістограм.

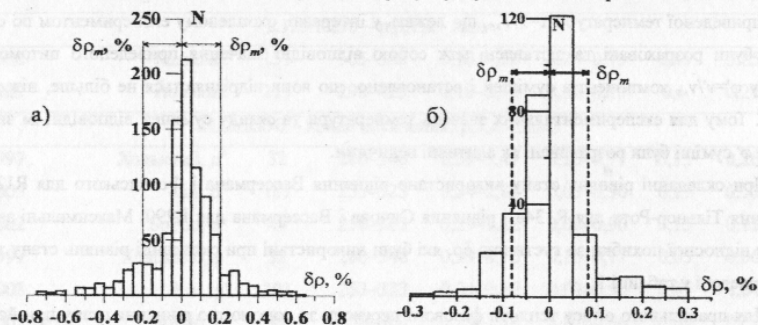


Рис. 2. Гістограми відхилень експериментальних і опорних значень густини від розрахованих за рівнянням стану для сумішей R125/R290 (а) і R134a/R290 (б)

Для зручності сприйняття відхилення для експериментальних і опорних значень тиску та густини сумішей від розрахованих також наведені в дисертації у вигляді графіків: залежності відхилень експериментальних значень густини у однофазній області ($\delta \rho$) від тиску (або температури) або залежності відхилень експериментальних значень тиску (δp) та опорних значень густини ($\delta \rho$) у стані насичення від складу суміші.

На базі складених рівнянь стану зроблено аналіз термодинамічної поведінки сумішей R125/R290 і R134a/R290 у стані фазової рівноваги для складів 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 мольної долі першого компоненту. Показано, що ці суміші мають азеотропні склади: перша суміш при $x_{R125} = 0,6$, а друга – при $x_{R134a} = 0,4$. Близькими до азеотропних є значення складу 0,8 (для R125/R290) і 0,2 (для R134a/R290). Для сумішей цих складів різниця між температурами насичених пари та рідини у діапазоні дії рівнянь стану не перевищує 2 К. Максимальна різниця між T'' і T' складає 8 К для R125/R290 при $x_{R125} = 0,2$ і 13 К для R134a/R290 при $x_{R134a} = 0,8$. При цих значеннях складу вказані суміші використовувати як холодоагенти недоцільно.

За допомогою отриманих рівнянь стану розраховані таблиці термодинамічних властивостей на кривій насичення та у однофазній області в інтервалі тиску 0,05 – 6 МПа та температури 240 – 440 К для суміші R125/R290 і 240 – 420 К для суміші R134a/R290 для двох значень складу: азеотропного та близького до нього. Ці таблиці наведені у додатку Б до дисертації і містять значення густини ρ (кг/м³), ентальпії h (кДж/кг) та ентропії s (кДж/кг·К). Значення термодинамічних властивостей отримані шляхом диференціювання вільної енергії Гельмгольца за допомогою виразів, які одержані на підставі рівняння стану (1) і відомих диференціальних співвідношень термодинаміки.

У зв'язку з відсутністю даних про калоричні властивості досліджуваних сумішей ми порівняли розраховані значення термодинамічних властивостей з даними, отриманими за допомогою автоматизованої системи REFPROP (версія 7.0). Розраховані значення властивостей в цілому задовільно узгоджуються з даними REFPROP у досить широкій області параметрів. У більшості точок з великими розходженнями з даними REFPROP спостерігається крапе узгодження з експериментальними p, ρ, T, x -даними.

На підставі порівняння з експериментальними даними та даними REFPROP виконана оцінка погрешності розрахованих значень термодинамічних властивостей двох дослідних сумішей. В області параметрів, яка досліджена експериментально ($T = 300 - 420$ К і p до 3,5 МПа при низьких температурах і до 6,7 МПа при високих) погрешність розрахунку значень густини не перевищує $\pm 0,3$ %, а значень тиску насичених пари та рідини – ± 2 %. Можливі погрешності для більшості розрахованих значень густини у недослідженій області, а також ентальпії і ентропії складають: 0,3 %, 2,5 кДж/кг і 0,005 кДж/(кг·К) для пари і 2 %, 4 кДж/кг і 0,005 кДж/(кг·К) для рідини. Таким чином значення термодинамічних властивостей сумішей R125/R290 і R134a/R290 мають прийнятну точність і можуть бути використані для розрахунків холодильних установок.

Третій розділ присвячений складанню рівнянь стану для сумішей R23/R744 і R41/R744 і отриманню за їх допомогою таблиць термодинамічних властивостей. Кількість експериментальних і розрахованих даних для цих сумішей, а також їх діапазон за температурою, тиском та мольною концентрацією наведені у таблиці 3.

Як і для сумішей з пропаном, експериментальні дані про густину насичених пари і рідини вказаних сумішей відсутні. Тому нами розроблені відповідні опорні дані за тією же методикою, що і для двох сумішей, розглянутих в розділі 2.

Таблиця 3. Перелік p, ρ, T, x -даних, які були використані при складанні рівнянь стану сумішей R23/R744 і R41/R744, задані погрішності даних δp , використані для розрахунку ваги цих даних та середні квадратичні відхилення $\delta \rho_m$ вихідних значень густини від розрахованих

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів			δp , (%)	$\delta \rho_m$, (%)
			T, K	p, MPa	x		
R23/R744 – p, ρ, T, x - дані							
2003	Нікола	121	261–353	2,04–5,88	0,10–0,78	0,1	0,11
2003	Нікола	174	303–343	0,15–5,86	0,15–0,86	0,1	0,12
R23/R744 – крива насичення (p, T, x - дані)							
2003	Нікола, ρ''	8	274–286	3,14–3,80	0,10–0,78	0,1	0,01
1992	Рот, ρ''	39	254–293	1,50–5,59	0,07–0,94	0,1	0,04
1992	Рот, ρ'	39	254–293	1,50–5,59	0,08–0,95	0,05	0,09
2006	ρ'' для ρ'' при $x = y$	81	254–293	1,51–5,58	0,08–0,92	0,10	0,08
2006	ρ' для ρ' при $x = y$	81	254–293	1,54–5,59	0,08–0,92	0,05	0,09
R41/R744 – p, ρ, T, x - дані							
1997	Холькомб	191	192–400	3,35–35,5	0,50	0,05	0,06
		18	318–332	3,64–9,92	0,50	0,05	0,12*
2003	Даморе	199	303–343	0,12–5,65	0,21–0,82	0,15	0,17
2005	Нікола	17	273–334	2,24–5,91	0,24–0,62	0,15	0,39
R41/R744 – крива насичення (p, T, x - дані)							
2005	Нікола ρ''	5	260–293	2,07–4,32	0,24–0,79	0,1	0,09
2006	Дані про ρ''	23	218–290	0,43–4,78	0,01–0,58	0,1	0,11
2006	Дані про ρ'	23	218–290	0,43–4,78	0,01–0,67	0,05	0,02
2006	ρ'' для ρ'' при $x = y$	44	218–293	0,34–4,66	0,15–0,85	0,10	0,10
2006	ρ' для ρ' при $x = y$	44	218–293	0,37–4,78	0,15–0,85	0,05	0,02

* Для 18 точок у критичній області вказані значення $\delta \rho_m$

Для компонентів були використані: рівняння Пенончелло (2003) для R23, рівняння Леммона (2006) для R41 і рівняння Шпана (2003) для R744.

При складанні рівнянь стану виконувалася умова фазової рівноваги у вигляді рівності площ під реальною та розрахованою ізотермами суміші постійного складу в інтервалі від v' до v'' за тією самою методикою, що і для сумішей з пропаном.

Значення коефіцієнтів a_{ij} і b_{ij} функції взаємодії (2) для сумішей R23/R744 і R41/R744 наведені у таблиці 4.

Середні квадратичні відхилення $\delta \rho_m$ вихідних значень p від розрахованих за рівнянням стану для суміші R23/R744 і R41/R744 наведені у таблиці 3. Значення середніх квадратичних відхилень для експериментальних значень тиску та опорних значень густини насичених пари та рідини суміші R23/R744 при виконанні строгої умови фазової рівноваги дорівнюють відповідно

Таблиця 4. Коефіцієнти a_{ij} та b_{ij} функції взаємодії (2) сумішей R23/R744 і R41/R744

R125/R290						R41/R744					
i	j	a_{ij}	i	j	b_{ij}	i	j	a_{ij}	i	j	b_{ij}
1	3	$6,41290798 \cdot 10^0$	3	3	$-1,92204385 \cdot 10^0$	1	0	$-2,58961800 \cdot 10^{-1}$	1	1	$-1,11960271 \cdot 10^1$
1	4	$-1,57010103 \cdot 10^{+1}$	3	4	$2,01214015 \cdot 10^0$	1	1	$6,50545850 \cdot 10^{-1}$	1	2	$5,14520561 \cdot 10^1$
1	5	$1,35431759 \cdot 10^{+1}$	8	5	$-1,21870528 \cdot 10^{-2}$	2	3	$-4,06254350 \cdot 10^{-1}$	1	3	$-8,76714663 \cdot 10^1$
1	6	$-3,98254692 \cdot 10^0$	9	1	$2,51489056 \cdot 10^{-3}$	2	4	$2,03002426 \cdot 10^{-1}$	1	4	$6,55460058 \cdot 10^1$
2	3	$-2,37683090 \cdot 10^{-1}$				5	2	$5,75584718 \cdot 10^{-3}$	1	5	$-1,84366622 \cdot 10^1$
3	3	$9,12493010 \cdot 10^{-2}$				6	0	$-6,26640203 \cdot 10^{-4}$	2	2	$-3,42740592 \cdot 10^{-1}$
8	0	$-3,43976854 \cdot 10^{-4}$				6	5	$-6,30656936 \cdot 10^{-4}$	2	3	$3,69351508 \cdot 10^{-1}$
						7	6	$6,34533112 \cdot 10^{-5}$	4	5	$-1,45253784 \cdot 10^{-1}$

0,72 та 0,69 % для ρ'' і ρ' та 1,69 та 0,06 % для ρ'' і ρ' , а для суміші R41/R744 дорівнюють: 0,81 % і 0,73 % для ρ'' і ρ' та 1,07 % і 0,03 % для ρ'' і ρ' .

На рисунку 3 наведені гістограми відхилень експериментальних і опорних значень густини від розрахованих за рівняннями стану для сумішей R23/R744 (а) і R41/R744 (б). Всього у складанні рівнянь стану приймало участь: 496 точок для суміші R23/R744 (з них 295 експериментальних і 201 отримана шляхом розрахунку) та 564 точок для суміші R41/R744 (з них 425 експериментальних і 139 розрахованих). Як можна бачити з гістограм, розподіл відхилень на них досить близький до нормального.

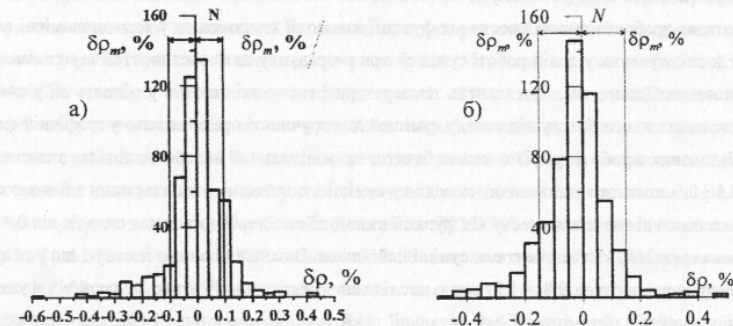


Рис. 3. Гістограми відхилень експериментальних і опорних значень густини від розрахованих за рівняннями стану для сумішей R23/R744 (а) і R41/R744 (б)

Отримані значення відхилень для експериментальних і опорних значень тиску та густини сумішей також зображені в дисертації у вигляді графіків залежності відхилень по густині ($\delta \rho$) від тиску (або температури) або залежності відхилень по тиску (δp) та густині ($\delta \rho$) у стані насичення від складу суміші.

Як і для сумішей з пропаном, зроблено аналіз термодинамічної поведінки сумішей R23/R744 і R41/R744 у стані фазової рівноваги для складів 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 мольної долі першого компоненту. Аналіз показує, що різниця між температурами насичених пари та рідини на ізобарі для обох сумішей не перевищує 1,8 К. Тому ці суміші можуть використовуватися у широкому інтервалі значень складу, на відміну від сумішей з пропаном. Негативним для сумішей з R744 є наявність низьких значень критичних температур, які визначаються критичними температурами компонентів.

За отриманими рівняннями стану розраховані таблиці термодинамічних властивостей на кривій насичення та у однофазній області в інтервалах $240 \div 400$ К і $0,05 \div 6$ МПа для суміші R125/R290 та $220 \div 420$ К і $0,05 \div 35$ МПа для суміші R134a/R290 для чотирьох значень складу (0,2; 0,4; 0,6 і 0,8 мольної долі компоненту R125 або R134a). Ці таблиці наведені у додатку Б до дисертації.

У зв'язку з відсутністю даних по калоричним властивостям, як і для попередніх сумішей, ми порівняли розраховані значення густини, ентальпії та ентропії у однофазній області та у стані насичення, а також тиску насичених пари і рідини з даними, отриманими за допомогою системи REFPROP. На підставі порівняння з експериментальними даними та даними REFPROP виконана детальна оцінка погрішності розрахованих значень термодинамічних властивостей двох дослідних сумішей. Для більшості розрахованих нами значень густини, ентальпії і ентропії ці погрішності відповідно складають: 0,4 %, 2 кДж/кг і 0,005 кДж/(кг·К) для суміші R23/R744 і 0,3 %, 4 кДж/кг і 0,01 кДж/(кг·К) для R41/R744.

Додатково зроблена оцінка внеску від функції взаємодії компонентів у термодинамічні властивості досліджуваних у даній роботі сумішей при розрахунку цих властивостей за методикою, запропонованою Леммоном. Для значень температури і тиску, які входять у область дії рівнянь стану залежність цього внеску від складу сумішей для зручності представлено у графічній формі. З побудованих в роботі графіків можна бачити, що мінімальний внесок відповідає значенням складу 0,1 і 0,9, коли термодинамічну поведінку суміші в основному визначає один з її компонентів, а максимальні значення внеску від функції взаємодії спостерігаються для складів від 0,4 до 0,6, коли взаємодія між компонентами суміші найбільша. Виконаний аналіз показує, що у області приведених температур 0,8 – 1,2, яка є дослідженою експериментально, внесок від функції взаємодії у значення питомого об'єму, ентальпії та ентропії не перевищує 20 %, тому для вказаної області використання надійних рівнянь стану для компонентів при складанні рівняння стану суміші у найбільшій мірі визначає надійність цього рівняння. При низьких температурах, де експериментальні дані у однофазній області відсутні, внесок від функції взаємодії може перевищувати 20 %. Тому у області низьких температур при складанні рівняння стану суміші поряд з надійними рівняннями стану для компонентів особливе значення здобувають наявність та точність експериментальних p, v, T, x -даних.

Четвертий розділ присвячений опису створеної автоматизованої інформаційної системи, яка дозволяє розраховувати теплофізичні властивості одноатомних і двоатомних газів, повітря,

двоокису вуглецю, води, аміаку, деяких вуглеводнів, озонобезпечних холодоагентів і сумішей, включаючи досліджувані у роботі суміші. Властивості розраховуються при заданих двох незалежних змінних для однофазної та двофазної областей та однієї незалежної змінної для розрахунку властивостей на кривій насичення або плавлення. Набір теплофізичних властивостей та їх одиниці вимірювання можуть бути вибрані у відповідності з поставленою задачею. Розраховані властивості можуть бути збережені у вигляді текстового файлу або таблиці MS Excel. Для розрахунку термодинамічних властивостей речовин у системі використовуються єдині рівняння стану у поліноміальній та фундаментальній формах, а для розрахунку транспортних властивостей використовуються залежності в'язкості і теплопровідності від температури та густини. Для більшості речовин використані надійні рівняння стану, які описують експериментальні дані про властивості з високою точністю.

Розрахунок теплофізичних властивостей може проводитися у дванадцяти різних комбінаціях незалежних змінних ($T-p$, $T-v$, $T-p$, $T-h$, $T-s$, $T-x$, $p-p$, $p-v$, $p-h$, $p-s$, $p-x$, $h-s$). Складнощі при розрахунку у різних комбінаціях змінних виникають, тому що у рівняннях стану густина і температура мають степені вище трьох і для визначення цих параметрів необхідно використовувати ітераційні методи. Точність розрахунку забезпечується завданням малих значень припустимих погрішностей у ітераційних циклах.

Автоматизована система також містить у вигляді додаткового блоку програму для розрахунку циклів одноступеневих пароконденсаторних холодильних установок. За допомогою цієї програми розраховані значення холодильного коефіцієнту ϵ і питомої об'ємної холодопродуктивності q_0 одноступеневої холодильної установки при використанні у якості холодоагентів досліджуваних у роботі сумішей, їх компонентів а також R22. Показано, що для сумішей R125/R290 і R134a/R290 значення холодильного коефіцієнту на 2...27 % нижче, ніж у R22 та на 1...23 % нижче, чим у компонентів. Незважаючи на більш низькі значення ϵ , об'ємна холодопродуктивність цих сумішей на 12...45 % вище, ніж у чистих речовин. Останнє пояснюється тим, що у розглядаємих азеотропних сумішей у стані насичення у порівнянні з компонентами при однакових температурах значення тиску більше. Для суміші R23/R744 значення холодильного коефіцієнту на 2...61 % менше, ніж у R22 і компонентів. Величини ϵ суміші R41/R744 відрізняються у межах ± 21 % від ϵ для R22 для різних значень температур випарювання та конденсації, на 7...39 % більше аналогічних значень для R41, на 1...14 % більше і на 2...20 % менше ϵ для R744 відповідно при значеннях мольної концентрації першого компоненту 0,2+0,4 та 0,6+0,8. Значення об'ємної холодопродуктивності сумішей у кілька раз більше, ніж значення q_0 R22. Величини q_0 суміші R23/R744 більше, ніж у R23 на 15...29 % і менше, ніж у R744 на 6...24 %. Для суміші R41/R744 значення об'ємної холодопродуктивності більше, ніж у першого компоненту на 6...39 % і менше, ніж у другого на 2...43 %.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз наявних експериментальних даних для перспективних сумішей R125/R290, R134a/R290, R23/R744, R41/R744 показує, що на їх основі можливо складання рівнянь стану для вказаних сумішей. Такі рівняння можуть бути використані для розрахунку експериментально обґрунтованих таблиць термодинамічних властивостей досліджуваних сумішей у діапазонах параметрів, характерних для роботи холодильних установок.

2. Розрахунком на підставі даних для добре дослідженої суміші R32/R125 показана можливість отримання достатньо надійних рівнянь стану для сумішей холодоагентів при використанні обмеженої кількості експериментальних даних.

3. Детальне порівняння показало, що отримані на базі експериментальних та опорних p, ρ, T, x -даних рівняння стану для сумішей R125/R290, R134a/R290, R23/R744 і R41/R744 описують вказані дані з точністю, що відповідає точності їх визначення.

4. Встановлено, що суміші R125/R290 і R134a/R290 мають азеотропні склади, а для неазеотропних складів цих сумішей максимальні різниці між температурами насичених пари та рідини на ізобарах дорівнюють 8 К і 13 К для R125/R290 і R134a/R290 відповідно. Для сумішей R23/R744 і R41/R744 ці різниці не перевищують 2 К.

5. На підставі порівняння з експериментальними даними та даними REFPROP показано, що розраховані таблиці густини, ентальпії та ентропії чотирьох сумішей для кривої насичення та однофазної області для інтервалу тиску $0,05 \div 6$ МПа та інтервалів температури $240 \div 400$ К (для R125/R290, R134a/R290 і R23/R744) та інтервалів $0,05 \div 35$ МПа і $220 \div 420$ К для R41/R744 мають точність, прийнятну для інженерних розрахунків.

6. Показано, що у експериментально дослідженій області при τ від 0,8 до 1,2 величина внеску від функції взаємодії компонентів, визначеною за методикою Леммона, не перевищує 12 – 20 % від внеску компонентів суміші. При більш низьких температурах при складанні рівняння стану суміші поряд з надійними рівняннями стану для компонентів особливе значення також здобувають наявність та точність експериментальних p, v, T, x -даних.

7. Розрахунки, виконані за допомогою розробленої в дисертації автоматизованої інформаційної системи показали, що незважаючи на більш низькі значення холодильного коефіцієнту, об'ємна холодопродуктивність сумішей в основному приймає більші значення, ніж у чистих компонентів.

ОПУБЛІКОВАНІ РОБОТИ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Вассерман А.А., Мальчевский В.П. Уравнение состояния смеси хладагентов R125/R290// Холодильная техника и технология. – 2006. – № 1. – С. 78 – 82.
2. Вассерман А.А., Мальчевский В.П. Уравнение состояния смеси хладагентов R134a/R290// Проблемы техники. – 2006. – № 1. – С. 66 – 73.

3. Вассерман А.А., Мальчевский В.П., Богданов А.В. О точности уравнения состояния смеси, составленного на основе ограниченного количества экспериментальных данных// Проблемы техники. – 2006. – № 3. – С. 83 – 91.
4. Мальчевский В.П. Уравнение состояния смеси хладагентов R23/R744// Холодильная техника и технология. – 2006. – № 6. – С. 66 – 69.
5. Вассерман А.А., Мальчевский В.П. Термодинамические свойства смеси хладагентов R41/R744// Вісник Одеського національного морського університету. – 2007. – Вип. 21. – С. 97 – 108.
6. Мальчевский В.П. Термодинамические свойства смеси хладагентов R125/R290// Проблемы техники. – 2007. – № 2. – С. 55 – 63.
7. Вассерман А.А., Мальчевский В.П. Система для расчета теплофизических свойств криогенных веществ и альтернативных хладагентов// Технические газы. – 2007. – № 5. – С. 59 – 64.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

v – питомий об'єм, $\text{м}^3/\text{моль}$; ρ – густина, $\text{моль}/\text{м}^3$; t – температура, $^{\circ}\text{C}$; T – абсолютна температура, К; ω – зведена густина ($\omega = \rho/\rho_{\text{кр}}$); ϕ – зведений питомий об'єм ($\phi = v/v_{\text{кр}}$); τ – зведена температура ($\tau = T/T_{\text{кр}}$); θ – обернена зведена температура ($\theta = T_{\text{кр}}/T$); R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); A – вільна енергія Гельмгольца, Дж; a – мольна вільна енергія Гельмгольца, Дж/моль; α – безрозмірна вільна енергія Гельмгольца ($\alpha = a/RT$); x_i – мольна доля i -го компонента суміші; δ – відносне відхилення;

Індекс

Властивості: ' – на лінії кипіння; " – на лінії конденсації; i – ідеально-газова складова; E – індекс для функції взаємодії компонентів суміші; idmix – ідеальна суміш; 0 – властивості ідеального газу; g – реально газова складова; i, j – індекси коефіцієнтів; s – властивість в стані насичення; кр – критичний параметр; mix – властивості суміші.

АНОТАЦІЯ

Мальчевський В.П. Термодинамічні властивості сумішей озонобезпечних та природних холодоагентів. – 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.

Зроблений аналіз експериментальних даних про термодинамічні властивості перспективних сумішей R125/R290, R134a/R290, R23/R744 і R41/R744. Виконаний огляд найбільш поширених методів розрахунку термодинамічних властивостей сумішей і показано, що для вказаних сумішей оптимальною є методика Леммона. Розроблена програма складання рівняння стану сумішей з наборами статистично значущих коефіцієнтів.

На підставі даних для добре дослідженої суміші R32/R125 показано можливість складання надійного рівняння стану на базі обмеженої кількості опорних даних. На базі експериментальних і додатково отриманих опорних даних складені рівняння стану досліджуваних сумішей, які описують їх термодинамічні властивості у однофазній області і у стані насичення. За допомогою рівнянь стану розраховані таблиці термодинамічних властивостей сумішей у інтервалах параметрів $0,05 \div 6$ МПа та $240 \div 440$ К, $240 \div 420$ К і $240 \div 400$ К (відповідно для R125/R290, R134a/R290 і R23/R744) і у інтервалах $0,05 \div 35$ МПа і $220 \div 420$ К для R41/R744. Досліджена термодинамічна поведінка сумішей у стані фазової рівноваги.

Зроблена оцінка внеску від функції взаємодії компонентів у термодинамічні властивості досліджуваних у даній роботі сумішей при розрахунку цих властивостей за отриманими рівняннями стану.

Розроблена автоматизована інформаційна система для розрахунку теплофізичних властивостей великої кількості речовин, включаючи досліджувані у роботі суміші, у різних системах незалежних змінних. За допомогою додатково включеної у систему програми розрахунку циклу одноступеневої холодильної установки досліджена ефективність цього циклу при використанні у якості робочих речовин досліджуваних сумішей, їх компонентів та R22.

АННОТАЦИЯ

Мальчевский В.П. Термодинамические свойства смесей озонобезопасных и природных хладагентов. – 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.

Произведен анализ экспериментальных данных о термодинамических свойствах перспективных смесей R125/R290, R134a/R290, R23/R744 и R41/R744. Сделан обзор наиболее распространенных методов расчета термодинамических свойств смесей хладагентов и показано, что для указанных смесей оптимальной является методика Леммона. Разработана программа составления уравнения состояния смесей с наборами статистически значимых коэффициентов.

На основе данных для хорошо исследованной смеси R32/R125 показана возможность составления надежного уравнения состояния на базе ограниченного количества опорных данных. На базе экспериментальных и дополнительно полученных опорных данных составлены уравнения состояния исследуемых смесей, которые описывают их термодинамические свойства в однофазной области и в состоянии насыщения. С помощью уравнений состояния рассчитаны таблицы термодинамических свойств смесей в интервалах параметров $0,05 \div 6$ МПа и $240 \div 440$ К, $240 \div 420$ К и $240 \div 400$ К (соответственно для R125/R290, R134a/R290 и R23/R744) и в интервалах $0,05 \div 35$ МПа и $220 \div 420$ К для R41/R744. Исследовано термодинамическое поведение смесей в состоянии фазового равновесия.

Оценен вклад функции взаимодействия компонентов в термодинамические свойства исследованных в данной работе смесей при расчете свойств по полученным уравнениям состояния.

Разработана автоматизированная информационная система для расчета теплофизических свойств большого количества веществ, включая исследуемые в работе смеси, в различных системах независимых переменных. С помощью дополнительно включенной в систему программы расчета цикла одноступенчатой холодильной установки исследована эффективность этого цикла при использовании в качестве рабочих веществ исследуемых смесей, их компонентов и R22.

ABSTRACT

Malchevsky V.P. Thermodynamic properties of ozonesafe and natural refrigerants mixtures. – The manuscript.

Thesis for a candidate of engineering science degree by speciality 05.14.06 – Technical thermophysics and industrial heat power engineering. Odessa state academy of refrigeration, Odessa, 2007.

The analysis of experimental data on thermodynamic properties of perspective mixtures R125/R290, R134a/R290, R23/R744 and R41/R744 was done. The survey of the most well-known methods of calculation of mixture's thermodynamic properties have been carried out and their was indicated that the optimal method for selected four mixtures is the Lemmon's method. A program for compiling of equations of state with sets of statistically significant coefficients has been created.

On the basis of data for well-research mixture R32/R125 a possibility of compiling the reliable equation of state using the restricted number of data has been revealed. On the experimental and additionally received abutment data the equations of state have been compiled for researched mixtures, which describe the thermodynamic properties in the one-phase region and in saturation state. The tables of thermodynamic properties of mixtures have been calculated by equations in the ranges of parameters $0,05 \div 6$ MPa and $240 \div 440$ K, $240 \div 420$ K and $240 \div 400$ K (respectively for R125/R290, R134a/R290 and R23/R744) and also in intervals $0,05 \div 35$ MPa and $220 \div 420$ K for R41/R744. The thermodynamic behavior of mixtures in vapor-liquid equilibrium state was also investigated.

The contribution of the excess function of mixtures' components to the values of thermodynamic properties of researched in this work mixtures have been evaluated during the calculation of these properties on compiled equations of state.

An automated informatics system was developed for calculation of thermophysical properties of bulk substances including researched in this work mixtures in different systems of independent variables. The efficiency of one-stage cycle of refrigeration plants on the basis of learned mixtures, their components and R22 was investigated with the help of program, additionally included to the automated system.

xv 1267
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

