

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

На правах рукопису

СЕМЕНЮК Юрій Володимирович

**ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
ОЗОНОБЕЗПЕЧНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ
АГЕНТІВ R134a, R125, R23/R116 І R22/R142b
(Експеримент і методи розрахунку)**

Спеціальність **05.14.06** — Технічна теплофізика

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Одеса — 1997



00751187 (Т)

Робота виконана в Одеській державній академії холоду

- Науковий керівник: - кандидат технічних наук, доцент
В.П.Желєзний
- Офіційні опоненти - доктор фізико-математичних наук, професор
В.Б.Роганков
- кандидат технічних наук, доцент
Н.І.Лапардін
- Ведуча організація - Фізико-хімічний інститут Національної
академії наук України, м.Одеса

Захист дисертації відбудеться "30" червня 1997 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої Вченої Ради D 05.20.01 в Одеській державній академії холоду за адресою: 270100, м.Одеса, вул. Дворянська, 1/3.

Просимо взяти участь в роботі спеціалізованої Ради або надіслати Ваш відгук на автореферат у двох примірниках, затверджених гербовою печаткою за адресою: 270100, м. Одеса-100, вул. Дворянська, 1/3, відділ аспірантури.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ОДАХ.

Автореферат розіслано "30" травня 1997 року.

Вчений секретар
Спеціалізованої Ради
д.т.н., проф.

В.А.Календерьян

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

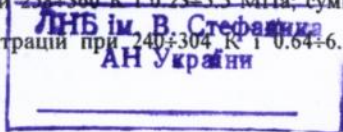
Актуальність теми. Серед заходів, що приймаються світовим співтовариством щодо регулювання виробництва і споживання озоноруйнівних речовин, головним є вимога повної відмови до 2000 року від використання хлорфторвуглеців (ХФВ) у всіх видах холодильного устаткування. Необхідність заміни цих речовин, які знайшли широке застосування як теплоносії, розчинники та зпінюючі агенти, стала причиною пошуку нових альтернативних з'єднань, близьких до ХФВ за фізико-хімічними властивостями. Розширення групи альтернативних холодагентів є можливим за рахунок створення композицій, які часто стають більш ефективними робочими тілами порівняно з їх чистими компонентами. Проведення оцінки ефективності використання нових робочих тіл в існуючому та тому, що розроблюється, холодильному устаткуванні, а також освоєння нових технологій, які використовують озонобезпечні холодагенти, є можливим на основі інформації про термодинамічні властивості, найбільш надійним засобом одержання якої залишається експеримент.

Дисертаційну роботу виконано у відповідності до Програми фундаментальних та пошукових досліджень Держкомітету з науки та техніки України від 07.08.92 р. № Держ. реєстрації 0193U017916.

Метою роботи є експериментальне дослідження термічних властивостей, у тому числі параметрів фазової рівноваги та критичних параметрів, озонобезпечних холодагентів R134a, R125, R23/R116 і R22/R142b з наступним узагальненням дослідних даних у вигляді рівнянь стану для розрахунку термодинамічних властивостей; розробка методики розрахунку термічних властивостей неасоційованих речовин на лінії рівноваги рідина-газ.

Наукова новизна і наукові результати:

1. Спроековано і створено установку, яка реалізує метод п'єзометра змінного об'єму, для дослідження термічних властивостей в однофазних зонах, стані фазової рівноваги і критичних параметрів чистих речовин та сумішей в інтервалі температур 240÷400 К і при тиску до 6.5 МПа.
2. Одержано експериментальні PVT дані:
 - в однофазних зонах для: R134a при температурах 212÷368 К і тисках 0.48÷20.7 МПа; R125 при 258÷360 К і 0.23÷5.5 МПа; суміші R23/R116 у всьому діапазоні концентрації при 240÷304 К і 0.64÷6.3 МПа; суміші



R22/R142b з концентрацією R142b 0.45 моль/моль при 304+337 К і 0.59+1.9 МПа;

- у стані рівноваги рідина-газ для: R134a при 212+364 К; R125 при 258+332 К; суміші R23/R116 на всій поверхні при 240 К+Т_c; суміші R22/R142b ($x=0.45$) при 304+337 К;
 - в критичних точках R134a та R125 і на критичній кривій суміші R23/R116. Більшість із вказаних даних одержано вперше.
3. Визначено, що суміш R23/R116 має позитивний азеотроп, склад якого в інтервалі 180+285 К змінюється від 0.33 до 0.39 мольних часток R116.
 4. Розроблено рівняння стану для досліджених холодагентів.
 5. Розраховано таблиці термодинамічних властивостей сумішею R23/R116 та R22/R142b ($x=0.45$) в газовій фазі та на лінії рівноваги рідина-газ.
 6. Розроблено методику розрахунку термічних властивостей неасоційованих речовин на лінії рівноваги рідина-газ, яка використовує нові аспекти теорії термодинамічної подібності.
 7. Підтверджено перспективність використання азеотропної суміші R23/R116 в низькотемпературних холодильних установках.

По результатам роботи сформульовано наукове положення:

Густина рідини й пари неасоційованих речовин на лінії фазової рівноваги підпорядковуються простим степеневим залежностям, які містять при показникові степеня кросоверні функції, що змінюються універсально.

Автор захищає:

1. Результати експериментального дослідження термічних властивостей, параметрів фазової рівноваги та критичних параметрів холодильних агентів R134a, R125, R23/R116, R22/R142b.
2. Рівняння стану, розроблені для R134a, R125, R23/R116, R22/R142b.
3. Таблиці термодинамічних властивостей R23/R116, R22/R142b.
4. Методику розрахунку термічних властивостей неасоційованих речовин на лінії рівноваги рідина-газ.

Практична цінність роботи. Створена у межах цієї роботи експериментальна установка застосовується у дослідженнях, що проводяться на кафедрі інженерної теплофізики ОДАХ.

Наведена в дисертації інформація про термодинамічні властивості озонобезпечних холодильних агентів може бути застосована при проектуванні холодильного устаткування, яке має працювати на нових екологічно чистих та енергетично ефективних робочих тілах.

Значний інтерес становить методика розрахунку термічних властивостей неасоційованих речовин, яка дозволяє проводити розрахунки густини на лініях кипіння і конденсації та тиску насиченої пари на основі обмеженої початкової інформації, а також здійснювати критичний аналіз експериментальних чи розрахункових даних. Документи, що підтверджують використання добутих результатів, приведені в додатку дисертації.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідалися на: IX і X Всесоюзних теплофізичних школах, м.Тамбов, 1988, 1990 рр.; VIII Всесоюзній конференції по теплофізичним властивостям речовин, м.Новосибірськ, 1988 р.; III і IV Всесоюзних конференціях молодих дослідників, м.Новосибірськ, 1989, 1991 рр.; Всесоюзній науково-технічній конференції "Холод - народному господарству", м.Ленінград, 1991 р.; Робочій групі "Властивості холодильних агентів і теплоносіїв" Наукової Ради РАН по комплексній проблемі "Теплофізика і теплоенергетика", м.Санкт-Петербург, 1989, 1992 рр.; XIII Європейській конференції по теплофізичним властивостям, м.Ліссабон, Португалія, 1993 р.; V і VI Міжнародних конференціях по холоду, Університет Purdue, США, 1994, 1996рр.; IV Азіатській конференції по теплофізичним властивостям, м.Токіо, Японія, 1995 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 друкованих робіт.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Основний текст складає 128 сторінок машинописного тексту і містить 45 рисунків, 30 таблиць.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету дослідження, викладено наукову новизну та наукові результати, наукові положення роботи і практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі розглянуто стан проблеми заміни озоноруйнівних ХФВ на альтернативні речовини. Наведено дані про стан озонowego шару та наслідки його руйнування.

Виходячи з переліку холодагентів, заборонених Монреальським Протоколом, визначено об'єкти дослідження: R134a - речовина, найбільш близька по термодинамічним властивостям до R12; R125 - можлива альтернатива R22 та R502; суміш R23/R116 - холодагент, перспективний для заміни R13 і R503; R22/R142b - суміш перехідних речовин, яка має більш високу енергетичну ефективність порівняно з чистими компонентами й здатна замінити їх та R502 у вже діючому холодильному устаткуванні та теплових насосах. Оскільки впровадження нових холодильних агентів є неможливим без достовірної інформації про їх теплофізичні властивості, метою роботи визначено розробку таблиць термодинамічних властивостей перелічених речовин. Експериментально-розрахунковий метод, який було покладено до основи цього дослідження, є найбільш ефективним при вирішенні подібного роду важливих для холодильної техніки задач.

Крім експериментальних вимірювань PVT залежності, параметрів фазової рівноваги та критичних параметрів холодагентів і аналітичного узагальнення цих даних у вигляді рівнянь стану (PC), в роботі приділено значну увагу розробці розрахункових методик, які базуються на єдиному формалізмі побудови малоконстантних рівнянь для розрахунку термічних властивостей на бінодалі.

У другому розділі приведено аналіз літературної інформації про експериментальні дослідження термодинамічних властивостей R134a, R125, R23/R116 та R22/R142b. Визначено зони параметрів стану, в яких вимагалось проведення власних вимірів термічних властивостей.

У третьому розділі обґрунтовано вибір методів експериментального дослідження. Описано експериментальні установки, які використовувалися. Викладено методику проведення дослідів. Наведено результати вимірювань та їх зіставлення з даними других авторів. Проведено оцінку похибок вимірюваних величин.

Експериментальна установка, яка реалізує метод п'єзометра змінного об'єму, була створена спеціально для виконання цієї роботи. Принципову схему установки зображено на рис. 1. П'єзометр 9 являв собою товстостінну ампулу, виготовлену з молібденового скла, яка складалась із вузької (з внутрішнім діаметром $d_{\text{вн}}=3.4$ мм) та широкої ($d_{\text{вн}}=9.6$ мм) частин. У п'єзометрі передбачено перемішування речовини за допомогою кульки, що приводиться у рух постійним магнітом 1. Об'єм, який займався речовиною в експерименті, визначався за допомогою попередньо одержаної тарирувальної залежності з урахуванням термічної та баричної деформацій п'єзометра. Рідинний термостат 14, в якому розміщався п'єзометр, був обладнаний механічною мішалкою 17, розгінним 16 та регульовальним 15 нагрівачами. Охолення термостата здійснювалося за допомогою рідкого азоту, пара якого пропускала через теплообмінник 21. Для візуального спостереження за п'єзометром у стінках термостата розміщено оглядові вікна. Температура підтримувалась постійною (з коливаннями не більше 0.005 К) за допомогою автоматичної системи регулювання, що складалась з датчика 6 (платиновий термометр опору), мосту постійного струму МО-62 і високоточного регулятора ВРТ-2, який управляв потужністю нагрівача 15. Вимірювання температури здійснювалося за допомогою платинового термометра опору 5 типу ПТС-10. Опір термометра вимірювався за компенсаційною схемою з використанням потенціометра Р-308 класу 0.002 та зразкової котушки опору R321 класу 0.01. Система створення тиску складалась з балона 4 зі стисненим азотом, газомасляного 3 і ртутно-газового 2 роздільників з вікнами та вентиля тонкого регулювання В12. Надмірний тиск у системі вимірювався грузопоршневими манометрами 7 типу МП-6 та МП-60 класу 0.02. Абсолютний тиск визначався як сума показань МП, барометра і поправок на висоту стовпів ртуті та масла, а також на капілярну депресію. Вакуумування п'єзометра здійснювалось за допомогою насосів 13 (ВМ-461) та 18 (ЦВЛ-100) з використанням охолоджуваних пасток 20. Тиск вимірювався термопарними перетворювачами 19. Заповнення п'єзометра досліджуваною речовиною здійснювалось із спеціального балона 12 через роздільник 11. Маса заправленої речовини визначалась як різниця між результатами зважування балона до і після заправки. Зміст суміші знаходили по масам змішаних компонентів. Зважування проводилося на аналітичних терезах АДВ-200 з похибкою $4 \cdot 10^{-4}$ г. Експеримент по визначенню густини проводився по ізотермам. Починаючи з максимального значення, тиск понижували з певним кроком, який зменшували по мірі наближення до точок фазового переходу. При фіксованому тиску в умовах до-

сягнення термодинамічної рівноваги за допомогою катетометра КМ-8 вимірювали висоту рівня ртуті в п'єзометрі, а, отже, і об'єм останнього. Рівноважний стан вважали досягнутим, якщо об'єм речовини не змінювався на протязі 20-30 хвилин. Параметри на лініях кипіння і конденсації визначалися в точках перетину двофазної ділянки ізотерми з її рідиною та газовою гілками. Вимірювання критичних параметрів проводились по традиційній методиці, яка базується на візуальному спостереженні за поведінкою межі розділу фаз.

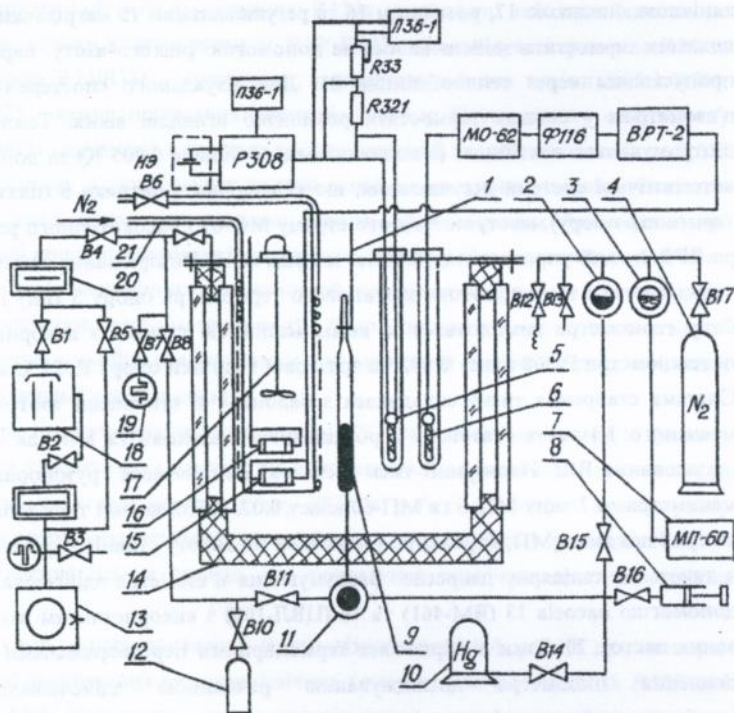


Рис.1 Принципова схема установки

З метою розширення зони параметрів дослідження і підвищення надійності одержуваних даних було проведено додаткові вимірювання густини R134a в рідкій фазі на установці, що реалізує метод п'єзометра постійного об'єму. Докладний опис цієї установки наведено в роботах Є.Г.Порічанського та В.К.Романова.

Як об'єкти дослідження використовувались речовини, синтезовані НВО ДПХ. Вміст основного продукту в зразках складав (мол.%): R134a - 99.90; R125 - 99.95; R23 - 99.79; R116 - 99.80; R22 - 99.82; R142b - 99.80.

Результатом проведеного дослідження стали такі дані. Методом п'єзометра змінного об'єму виміряно густину R134a на 8-ми ізотермах в інтервалі температур 262+364 К при тиску від 4.5 МПа до тиску насиченої пари P_s в рідкій фазі і від P_s до 0.77 МПа в газовій фазі. Кількість дослідних значень: 53 в рідині й 67 в газі. Методом п'єзометра постійного об'єму виміряно 25 значень густини рідини на 7-ми "квазіізохорах" в інтервалах 212+368 К і 0.48+20.7 МПа. В діапазоні 307+364 К одержано 6 значень P_s . В досліді одержано такі значення критичних параметрів R134a: $T_c=(374.25\pm 0.04)K$, $P_c=(4.059\pm 0.008)MПа$, $\rho_c=(509\pm 3) кг/м^3$.

Для R125 на 5-ти ізотермах в інтервалі 258+339 К одержано 37 значень густини рідини в інтервалі $P_s+5.5$ МПа і 103 значення густини газу при 0.23 МПа+ P_s . Виміряні значення критичних параметрів R125 склали: $T_c=(339.25\pm 0.04)K$, $P_c=(3.6214\pm 0.008)MПа$, $\rho_c=(566.5\pm 3) кг/м^3$.

PVTx залежність суміші R23/R116 досліджено для 7 концентрацій: $x=0.1015$; 0.2234; 0.3600; 0.4736; 0.5624; 0.7010; 0.8767 в інтервалах 240+304 К і 0.64+6.3 МПа. Всього одержано 396 значень густини рідини і 351 - густини газу. Знайдено параметри фазової рівноваги на 4-х ізотермах. Побудовані по цим даним діаграми P-x зображено на рис.2, з якого видно, що R23/R116 має позитивний азеотроп з постійним у досліджену діапазоні параметрів складом $x=0.36$. Для цієї суміші критичні параметри було виміряно на вказаних вище концентраціях і ще додатково на 3-х: $x=0.4991$; 0.7508; 0.9009. Одержані критичні локуси зображено на рис.3.

Для суміші R22/R142b з $x=0.45$ на ізотермах 304.61К, 323.75 К, 336.78 К одержано 8 значень густини рідини при 0.85+1.9 МПа і 18 значень густини газу при 0.59+1.5 МПа.

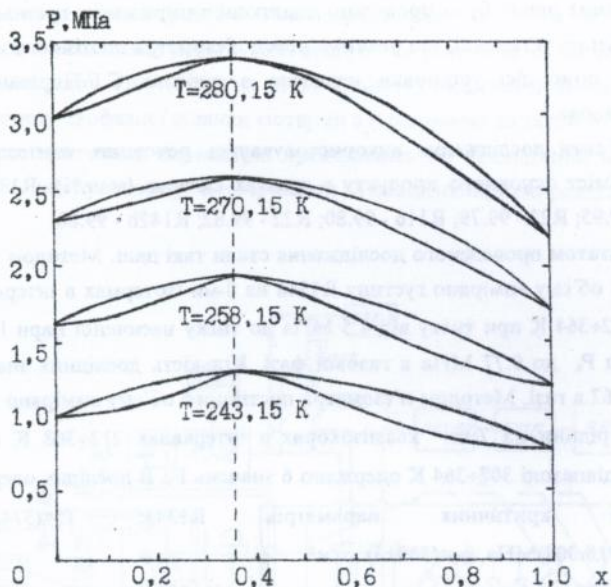


Рис.2 Фазова діаграма суміші R23/R116

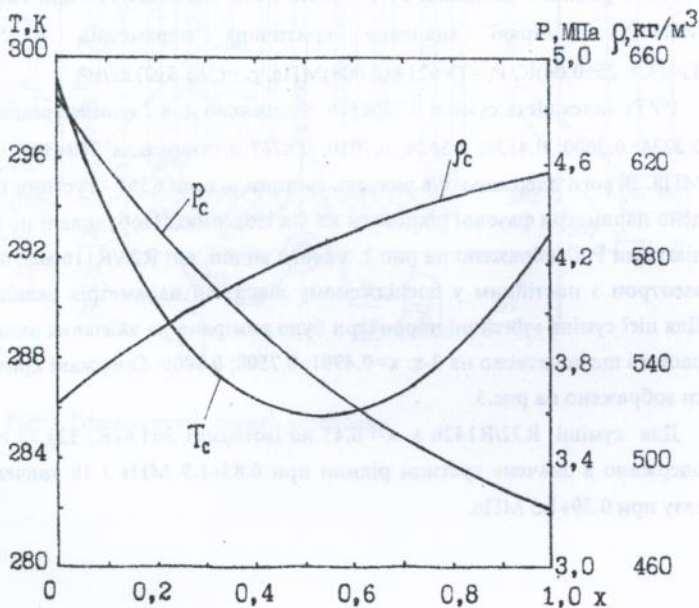


Рис.3 Критичні локуси суміші R23/R116

Температура вимірювалась з похибкою 0.015 К, тиск - 0.06%, склад суміші - $8 \cdot 10^{-4}$. Похибки дослідних даних без урахування похибок віднесення не перевищують таких значень: в рідині - $\delta\rho=0.18\%$, $\delta\rho'=0.20\%$, в газі - $\delta\rho=0.18\%$, $\delta\rho''=0.35\%$. Для похибок визначення параметрів фазової рівноваги сумішей одержано оцінки: $\delta\rho'=0.25\%$, $\delta\rho''=0.20\%$, $\delta\rho'''=0.40\%$, $\delta\rho''''=0.30\%$.

В четвертому розділі викладено розроблену в дисертації методику розрахунку термічних властивостей неасоційованих речовин на лінії рівноваги рідина-газ. Зроблено аналіз відомих методів розрахунку густини на бінодалі. Відмічено їх найбільш характерні недоліки: залежності, що пропонуються, не завжди термодинамічно узгоджені; більшість кореляцій носить емпіричний характер; їх побудова базується, як правило, на однопараметричному законі відповідних станів; вибір деяких критеріїв подібності термодинамічно не обґрунтовано; похибка розрахунку не завжди задовільна, а найбільші відхилення розрахункових величин спостерігаються поблизу потрійної точки і в достатньо широкому околі критичної точки.

В теорії фазових переходів звертають на себе увагу положення, розвинуті в роботах В.К.Семенченка, згідно з якими характер змінення термодинамічних величин першого роду (енергії, ентропії, об'єму і т.д.) обумовлюється їх флуктуаціями. Таке розуміння визначальної ролі флуктуацій дає підстави вважати, що, якщо деякий клас речовин має загальну закономірність у поведінці флуктуацій термодинамічної функції, то для останньої існує принципова можливість побудови універсальної залежності. Виконані в дисертації розрахунки для ряду неасоційованих речовин свідчать про наявність подібності у поведінці флуктуацій густини на бінодалі.

Другий аспект, що лежить в основі методики, яка пропонується, спирається на результати, досягнуті при опису теплофізичних властивостей у широкому околі критичної точки. припускається, що поведінка термодинамічних функцій на бінодалі підпорядковується простим степеневим залежностям. Однак по мірі віддалення від критичної точки ефективний показник степеню не зберігає постійного значення і змінюється по універсальній залежності, яка визначається кросоверною функцією. Для опису густин рідини і пари на бінодалі пропонуються такі залежності :

$$\ln \omega' = B' \Theta^{\beta'} f_1 \quad (1)$$

$$\ln \omega'' = -B'' \Theta^{\beta''} f_2, \quad (2)$$

де B' , β' , B'' , β'' - індивідуальні константи; $\Theta = -\ln t$; f_1 , f_2 - універсальні для неасоційованих речовин кросоверні функції.

Шляхом обробки найбільш надійних даних для ряду речовин (серед яких - інертні гази, вуглеводні, N_2 , O_2 , CO_2 , галоїдозаміщені вуглеводні) було одержано такі апроксимаційні залежності для кросоверних функцій:

$$f_1 = 1 - 1.113 \frac{\Theta^{0.4}}{\ln \Theta}, \quad f_2 = 1 + 4.861 \frac{\Theta^{0.6}}{\ln \Theta}. \quad (3)$$

Відзначимо, що кожна із залежностей (1) і (2) має лише дві індивідуальні константи, які відображають степінь термодинамічної подібності речовин. Це дає підстави розглядати їх як критерії термодинамічної подібності. Крім того, V' , V'' і β' , β'' мають зміст критичних амплітуд та критичних індексів, оскільки при $T \rightarrow T_c$ функції $f_1 \rightarrow 1$, $f_2 \rightarrow 1$, і, отже, вирази (1) і (2) набувають вигляду звичайних степеневих залежностей, що постулюються теорією критичних явищ.

Для опису тиску насиченої пари в роботі пропонується малоконстантна залежність

$$\ln \left(\frac{1}{\pi} \right) = \alpha_R \Theta + b \Theta^c \quad (4)$$

де α_R , b , c - індивідуальні константи. Диференціювання (4) показує, що параметр α_R є критерієм Ріделя. Другий член рівняння (4) вибрано таким чином, щоб виконувалась умова

$$\frac{d^2 \ln \pi}{d(\ln \tau)^2} \sim \left(\ln \frac{1}{\tau} \right)^{c-2}, \quad (5)$$

тобто реалізувалась би можливість переходу до степеневі залежності, в якій константа $(c-2)$ являла б собою критичний індекс.

Багаточисельні розрахунки (в тому числі для речовин, дані про які не включалися в обробку при знаходженні залежностей (3)) показують, що рівняння (1) може бути рекомендованим для інтервалу $0.35 \leq \tau \leq 1$, а рівняння (2) - для $0.75 \leq \tau \leq 1$. Рівняння (4) може бути застосованим практично для всієї зони параметрів існування двофазної системи. У вказаних інтервалах відхилення дослідних даних від розрахункових не перевищують, як правило, експериментальних похибок.

Реалістичність одержаних значень параметрів V' , β' , V'' , β'' підтверджується зіставленням із значеннями критичних індексів і амплітуд, виділених другими авторами при обробці дослідних даних для критичної зони. Цей факт відкриває можливості для прогнозних розрахунків термодинамічних величин, у тому числі й калоричних, з використанням відомих із теорії критичних явищ універсальних комплексів критичних індексів і амплітуд. Рівняння (1), (2) і (4)

мають хороші екстраполяційні можливості, що підтверджується наведеними в дисертації розрахунками. Крім того, ці рівняння можуть бути використаними для аналізу достовірності експериментальних і розрахункових даних, у тому числі значень критичних параметрів.

П'ятий розділ присвячено узагальненню результатів вимірів.

Дані на лінії рівноваги описано рівняннями(1), (2) і (4). Термічні властивості рідкої фази описано РС П.М.Кессельмана, яке базується на комірчаній моделі рідини з використанням ефективного міжмолекулярного потенціалу. Це рівняння має вид

$$Z = 1 - 1.744 \frac{\varepsilon_i}{K} \left((b_{0i} \rho)^2 - 0.4654 (b_{0i} \rho)^3 \right), \quad (6)$$

$$\text{де } \frac{\varepsilon_i}{K} = 0.795 T_C \exp(C_i(1 - \tau)), \quad b_{0i} = \frac{2}{3} \pi N_A \sigma_i^3, \quad \sigma_i^3 = 1 / \left(a_i + \frac{b_i T}{100} \right).$$

Для узагальнення всього об'єму одержаних в цій і других роботах даних про PVT залежність R134a використано єдине РС у формі

$$Z = 1 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} b_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^{j-1}}, \quad (7)$$

Цим же рівнянням апроксимовано PVT дані для газової фази R125.

Для холодильних агентів R134a, R125, R23, R116, R22 і R142b побудовано кубічні рівняння, які було використано для розрахунку властивостей сумішей, які містять вказані речовини. При цьому дані на лінії рівноваги описувались рівнянням виду

$$P = RT \left(\frac{1}{v - b_K} - \frac{a_K}{v(v + c_K)} \right), \quad (8)$$

а PVT дані в газовій фазі - рівнянням

$$P = RT \left(\frac{1}{v - b_K} - \frac{a_K}{v(v + c_K) + d_K} \right), \quad (9)$$

де a_K , b_K , c_K , d_K - коефіцієнти, які залежать від температури.

За допомогою рівнянь (8) і (9) розраховано таблиці термічних властивостей суміші R23/R116 і термодинамічних властивостей суміші R22/R142b у всьому діапазоні концентрацій.

Для розрахунку термодинамічних властивостей суміші R23/R116 з концентрацією $x=0.36$ використано рівняння (1), (4) і РС виду

$$P = \frac{RT}{v - b} + \sum_{i=1}^4 \frac{A_i + B_i T + C_i e^{-K_i \tau}}{v - b}, \quad (10)$$

побудоване на основі обробки PVT даних в газовій фазі.

За результатами виконаних по РС (8) розрахунків встановлено, що азеотропний склад R23/R116 змінюється в інтервалі температур 180+285 К від 0.33 до 0.36 мольних часток R116.

Проведені в роботі розрахунки енергетичних характеристик двохкаскадної низькотемпературної холодильної машини вказують на перспективність застосування азеотропної суміші R23/R116.

ВИСНОВКИ

1. Створено установку для дослідження термічних властивостей чистих речовин і сумішей в широкій зоні параметрів стану.
2. Одержано експериментальні дані про термічні властивості, фазову рівновагу і критичні параметри R134a, R125, R23/R116, R22/R142b.
3. Одержані PVT дані описані рівняннями стану, які дозволяють розраховувати термодинамічні властивості у широкій зоні параметрів стану.
4. Для суміші R23/R116 виявлено зону азеотропних складів.
5. Розраховано термодинамічні властивості сумішей R23/R116 і R22/R142b.
6. Розроблено методику розрахунку термічних властивостей неасоційованих речовин на лінії рівноваги рідина-газ.
7. Комплекс проведених досліджень підтверджує перспективність використання азеотропної суміші R23/R116 в низькотемпературних холодильних установках.

Основні положення і результати роботи відображені в таких публікаціях:

1. Железный В.П., Семенюк Ю.В., Качурка Ю.А. Принципы скейлинга в методе построения термодинамически согласованной системы уравнений для прогнозирования теплофизических свойств веществ // IX Всесоюзная теплофизическая школа: Тез.докл.- Тамбов, 1988.- С.28-29.
2. Железный В.П., Качурка Ю.А., Лясота Л.Д., Семенюк Ю.В. Принцип скейлинга в прогнозировании термодинамических свойств неассоциированных жидкостей и их бинарных смесей на линии насыщения // VIII Всесоюз. конф. по теплофизическим свойствам веществ: Тез.докл.- Новосибирск, 1988.- С.31-32.
3. Семенюк Ю.В., Черняк Ю.А. Экспериментальное исследование термических свойств и фазового равновесия системы R116-R23 // III Всесоюзная

конференция молодых исследователей: Тез.докл.- Новосибирск, 1989.- С.155-156.

4. Семенюк Ю.В., Железный В.П., Афтеньев Ю.М. Исследование фазового равновесия и критической кривой смеси R23-R116 // Холодильн.техника и технология: Респ.межвед.науч.-техн.сб.- 1990. - Вып.51.- С.79-81.
5. Железный В.П., Качурка Ю.А., Семенюк Ю.В. Экспериментально-расчетное исследование термических и калорических свойств экологически чистых хладагентов R134a и R23/R116 // X Всесоюзная теплофизическая школа: Тез.докл.-Тамбов, 1990.- С.24-25.
6. Кессельман П.М., Железный В.П., Семенюк Ю.В. Термические свойства хладагента R134a в жидкой фазе // Холодильная техника.-1991. -№7.-С.9-11.
7. Доброхотов А.В., Масленников А.В., Семенюк Ю.В., Устюжанин Е.Е. Плотность хладагента R134a - эксперимент и обобщение // Холодильная техника.-1991. -№7. - С.16-20.
8. Zhelezny V.P., Semenyuk Yu.V., Chernyak Yu.A. Investigations of thermodynamic properties and phase equilibria of refrigerants binary mixtures R134a-R218 and R134a-R152a // Proc.13-th European Conference on Thermophysical Properties. - Lisboa, Portugal, 1993.- P.361-362.
9. Железный В.П., Загорученко Н.В., Семенюк Ю.В. Термические свойства HFC125 // Проблемы теплофизики и теплообмена в холодильной технике: Межвузовский сб.научн.трудов.- Санкт-Петербург, 1994.- С.12-14.
- 10.Zhelezny V., Chernyak Yu, Anisimov V., Semenyuk Yu., Zhelesny P. Liquid-Vapor equilibria and thermal properties for the HFC32/125 and HFC143a/125 systems // Proc. 4-th Asian Thermophysical Properties Conference. - Tokyo, Japan, 1995.- P.335-338.
- 11.Zhelezny V.P., Semenyuk Yu.V., Anisimov V.N. Vapor-Liquid Equilibria in R23/R116 system and its thermodynamic properties // Proc.6th International Refrigeration Conference at Purdue.- USA, 1996.- P.453-458.
- 12.Анисимов В.Н., Железный В.П., Семенюк Ю.В., Черняк Ю.А. Термодинамические свойства смеси хладагентов FC218-HFC134a // ИФЖ.- 1996.- Т.69, №5.- С.756-760.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

T - температура; P - тиск; ρ - густина; V - питомий об'єм; v - мольний об'єм; x - концентрація другого компонента суміші; R - універсальна газова стала; Z - фактор стисливості; N_A - число Авогадро; k - стала Больцмана; τ , π , ω - температура, тиск, густина, приведені до критичних параметрів.

ІНДЕКСИ

' - належність до киплячої рідини; " - належність до насиченої пари; s - належність до лінії насичення; c - належність до критичної точки.

АНОТАЦІЯ

Семенов Ю.В. Термодинамические свойства озонобезопасных холодильных агентов R134a, R125, R23/R116 и R22/R142b (эксперимент и методы расчета). Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – Техническая теплофизика. Одесская государственная академия холода, Одесса, 1997.

Исследованы термические свойства R134a, R125, R23/R116 и R22/R142b в однофазных областях, в состоянии фазового равновесия и в критической точке. Построены уравнения состояния перечисленных хлад-агентов. Рассчитаны термодинамические свойства R23/R116 и R22/R142b. Разработана методика расчета термических свойств неассоциированных веществ на бинодали.

Ключевые слова: озонобезопасные хладагенты, термодинамические свойства, газ, жидкость, фазовое равновесие, уравнение состояния.

SUMMARY

Semenyuk Yu.V. Thermodynamical Properties of ozone-safe refrigerants R134a, R125, R23/R116 and R22/R142b (experiment and methods of calculation)/ The dissertation to achieve the degree of candidate of Engineering Sciences on speciality 05.14.06 – Technical Thermophysics.

Thermal properties, vapour-liquid equilibria and critical parameters of refrigerants R134a, R125, R23/R116 and R22/R142b have been measured. An equations of state for these refrigerants have been developed. Thermodynamic properties of R23/R116 and R22/R142b have been calculated. A method for calculation of thermal properties of normal substances have been elaborated.

Key words: Ozone-safe refrigerants, thermodynamical properties, gas, liquid, phase equilibria, equation of state.

Сдано в набор 28. 05. 97 г. Подписано к печати 29. 05. 97 г.
Объем 1 усл. печ. л. Формат 60x84/16.
Тираж 100 экз. Заказ № 282.

Отпечатано в типографии "Астропринт"
Тел. (0482) 26-98-82, 68-77-33

43994M

AB 38.059