

Автореферат
Т 76

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

Троценко Олександр Володимирович

УДК 536.483; 621.564

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ СИСТЕМ

Спеціальність 05.05.14 – Холодильна і криогенна техніка,
системи кондиціонування

Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській державній академії холоду, Міністерство освіти і науки України

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки України Наєр В'ячеслав Андрійович, професор кафедри кріогенної техніки Одеської державної академії холоду

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор, Мазур Віктор Олександрович, завідувач кафедри, Одеська державна академія холоду;

доктор технічних наук, професор, Нікульшін Володимир Русланович, завідувач кафедри, Одеський національний політехнічний університет;

доктор технічних наук, професор, Осокін Володимир Васильович, завідувач кафедри, Донецький державний університет економіки та торгівлі.

Провідна установа – Фізико – технічний інститут низьких температур НАН України, м. Харків

Захист відбудеться 25 12 2006 року о 12 годині в аудиторії 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.087.01 при Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки України за адресою: вул. Дворянська, 1/3, Одеса, Україна, 65082.

Дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОДАХ.

розісланий 23 11 2006р.

Одеської державної ради,

В. І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Сучасні досягнення обчислювальної техніки дають можливість ставити та вирішувати на більш високому рівні термодинамічні задачі автоматизованого проектування низькотемпературних установок. Головними факторами, що заважають реалізації цієї можливості є питання пов'язані з формалізацією елементів і циклів теплотехнічних систем. До них треба додати існуючі труднощі термодинаміки в області аналізу енергетичної ефективності об'єктів і властивостей їх робочих речовин. Цей перелік доводить складність і комплексність актуальної проблеми створення сучасного термодинамічного забезпечення для розрахунку та оптимізації установок низькотемпературної техніки.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Окремі розділи дисертації зв'язані з виконанням науково – дослідної роботи "Разработка систем охлаждения высокотемпературных сверхпроводников" у рамках міжвузівської науково – технічної програми "Высокотемпературные сверхпроводники", номер державної реєстрації 01890041166 (керівник теми, відповідальний виконавець), також держбюджетної теми "Дослідження методів використання енергії тиску природного газу магістральних трубопроводів", номер державної реєстрації 01970010052 (виконавець).

Мета і задачі дослідження. Метою цього дослідження є розвиток термодинамічних основ проектування циклів установок низькотемпературної техніки. Для її реалізації вирішувались наступні наукові задачі:

- вивчення особливостей термодинамічної системи як об'єкту оптимізації;
- дослідження основних критеріїв термодинамічної ефективності та взаємозв'язку оптимальних рішень при різних цільових функціях;
- розробка формалізованого підходу до термодинамічних розрахунків циклів низькотемпературної техніки;
- створення узагальнених алгоритмів вирішення типових термодинамічних задач низькотемпературної техніки;
- аналітичне дослідження термодинамічної ефективності простих циклів кріогенної техніки;
- розробка методу прогнозування та моделювання азеотропних перетворень у сумішах;
- аналітичне дослідження критичного стану чистих речовин.

Об'єктами дослідження даної роботи є низькотемпературні системи та їх робочі тіла.

Предмет дослідження – показники термодинамічної ефективності низькотемпературних систем і термодинамічні властивості робочих тіл.

При виконанні наведених задач використовувались методи теоретичних досліджень, зокрема аналітичні рішення, математичне моделювання, обчислювальні експерименти.

Наукова новизна отриманих результатів. В дисертації захищаються наступні вперше одержані наукові положення:

xv 7280
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

ОДЕСЬКА
ДЕРЖАВНА
БІБЛІОТЕКА

1. Всі однойменні параметри ККД реальної системи і складових його показників в стаціонарних точках відрізняються. Це положення не пов'язано ні з конкретним видом цільових функцій, ні з особливостями процесів в установці. Воно може бути розповсюджене на інші відносні показники (холодильний коефіцієнт, коефіцієнт зріджування та інші), які приймають позитивні значення.

2. Ексергетичні втрати є універсальним критерієм для перевірки практичної можливості здійснення процесу теплообміну в рекуперативних теплообмінних апаратах. Застосування цього критерію дало можливість у загальному вигляді вирішити проблему працездатності багатопотокового теплообмінника.

3. Будь-яка неперервна крива, яка знаходиться в області нестабільних станів термодинамічної поверхні суміші, може бути використана для прогнозування і моделювання азеотропних перетворень. Запроваджена в теорію термодинамічних властивостей максвеловська крива дозволяє визначати азеотропні стани без розрахунків парорідинної рівноваги сумішей. Це дало можливість виконати прогнозування перспективних робочих тіл дросельних мікрокриогенних систем.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи у вигляді математичних моделей та програмного забезпечення використані при проектуванні дросельних мікрокриогенних систем для охолодження високотемпературних надпровідників (ОДАХ, Одеса) і кріосистем "резервуар - насос" (АТ "Кисеньмаш", Одеса), теоретичному дослідженні схем енергозберігаючого зниження тиску магістральних газопроводів. Вони також ввійшли до учбового посібника автора з курсу "Автоматизоване проектування кріогенних установок", застосовані в дипломних роботах і проєктах, науково-дослідницьких роботах студентів. Окремі результати дисертації знайшли відображення в лекційних курсах, які веде автор в ОДАХ.

Створені узагальнені алгоритми можуть бути рекомендовані для застосування в термодинамічних розрахунках і оптимізації установок низькотемпературної техніки. Розроблений метод обчислення азеотропних перетворень є ефективним інструментом для пошуку нових перспективних робочих тіл холодильної та кріогенної техніки.

Особистий внесок здобувача в одержані наукові результатів полягає в висуненні їх ідей, в виконанні наведених в роботі аналітичних досліджень, а також в розробці узагальнених алгоритмів та програмного забезпечення для вирішення розглянутих термодинамічних задач. Він підтверджується 17 самостійними науковими публікаціями.

Апробація результатів дисертації проводилась на III – й Всесоюзній конференції "Криогенная техника - 82" (Москва, 1982), на Всесоюзній науково-технічній конференції "Микрокриогенная техника - 84" (Омск, 1984), Всесоюзній науково-практичній конференції "Интенсификация производства и применения искусственного холода" (Ленінград, 1986), IV – й Всесоюзній конференції по кріогенній техніці "Криогеника - 87" (Балашиха, 1987), II – й міжнародній науково-технічній конференції "Современные проблемы холодильной техники и технологии" (Одеса, 2002), IV – й міжнародній науково-технічній конференції "Совре-

менные проблемы холодильной техники и технологии" (Одеса, 2005), міжнародній науково-технічній конференції "Промисловий холод і аміак" (Одеса, 2006), III – й школі – семінарі "Применение эксергетических методов анализа и оптимизации с целью повышения эффективности использования энергетических ресурсов" (Алушта, 1988), нараді секції "Разработка методов сублимационного и криогенного консервирования пищевых продуктов и биологических материалов" (Київ, 1979).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 41 статті в наукових журналах і збірниках, у 9 тезисах конференцій і нарад, а також 2 авторських посвідченнях.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури. Загальний обсяг роботи складає 266 сторінок, включаючи 57 рисунків, 36 таблиць і 159 найменувань бібліографічних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В першому розділі дисертації проведений аналіз існуючих досліджень та розглянуті особливості низькотемпературної системи як об'єкту термодинамічної оптимізації, що дозволило сформулювати наступні головні результати, яких слід очікувати при вирішенні цього класу задач:

- для ряду систем низькотемпературної техніки термодинамічно оптимальні параметри близькі до значень, отриманих при термoeкономiчному аналізі (Бродянский В.М., Семенов А.М.). Встановлення цього факту дозволяє суттєво спростити знаходження ефективних рішень для реальних установок;
- при виконанні оптимізаційних розрахунків на базі термoeкономiчного аналізу ефективність системи може характеризуватись узагальненою функцією (Мартиновский В. С.), яка дозволяє вирішувати задачу методами термодинамічної оптимізації;
- на прикладі систем холодильної техніки видно, що "загальне підвищення ефективності машин, всупереч розповсюдженішому погляду про суттєвий вплив капітальних витрат на собівартість отриманого холоду, повинно здійснюватися в основному підвищенням енергетичної ефективності" (Курильов Е.С., Оносовський В.В., Бахарев И.Н. і ін.), напрям якого вказується термодинамічною оптимізацією;
- на стадії проектних робіт, коли "часто важко заздалегідь оцінити величини неенергетичних витрат" (Бродянский В.М., Семенов А.М.), інформація про термодинамічно оптимальні параметри дозволяє локалізувати область пошуку аналогічних величин реальної системи;
- отримані в результаті термодинамічної оптимізації показники ефективності циклу визначають його граничні можливості. Знання граничних показників, що можуть бути істотно меншими відповідних значень ідеальних циклів і процесів, необхідно для порівняння варіантів проектних рішень і контролю правильності термодинамічних розрахунків;

- математичне забезпечення термодинамічної оптимізації передбачає розробку ефективних моделюючих алгоритмів рішення відповідних термодинамічних задач. Створення для цього набору прикладних програм має самостійне значення і може використовуватися для варіантних розрахунків і виконання інших видів оптимізації системи;
- термодинамічна оптимізація установки, особливо проведена аналітично, дає змогу виявити взаємозв'язок між енергетичними показниками системи.

Одним з ключових питань термодинамічної оптимізації є вибір цільових функцій, який безпосередньо пов'язаний з обранням методом термодинамічного аналізу. Найбільш обґрунтованим і розвиненим можна вважати ексергетичний метод, що в основному оперує двома критеріями: ексергетичним ККД η_e і ексергетичними втратами D_e . В роботі розглянуті питання і особливості застосування в низькотемпературній техніці кожного з цих критеріїв. На основі ексергетичного балансу для будь-якої системи чи її підсистеми зв'язок між цими показниками виражається відомою залежністю

$$\eta_e = E''/E' = 1 - D_e/E', \quad (1)$$

де E' , E'' – відповідно підведені та відведені ексергетичні потоки для виділеного контуру.

В роботі виконано аналітичне дослідження рівнянь (1) при наявності стаціонарних точок, що стосується значень однойменних параметрів оптимізації x^0 ($x_1^0, \dots, x_n^0$), від яких залежать функції η_e , E' , E'' . Основні висновки з цього дослідження зводяться до твердження, що не існують таких параметрів системи чи її елементів x^0 , при яких:

- ККД і функція E'' приймають максимальних, а функція E' – мінімальних значень;
- має місце екстремум ККД і будь-якої з функцій E' , E'' ;
- всі однойменні незалежні змінні в стаціонарних точках цільових функцій η_e , E' , E'' повинні відрізнятися.

Ці висновки не пов'язані ні з конкретним виглядом критеріїв η_e , E' , E'' , ні з фізичними особливостями процесів в установці, ні з способом термодинамічного аналізу. З них, зокрема, витікає, що при наявності екстремумів у будь-яких з розглянутих функцій повинна існувати область компромісу між ними. Останнє доведено аналітичними дослідженнями простих циклів криогенної техніки, а також їх чисельними розрахунками.

На рис. 1 наведена типова залежність ексергетичної холодопродуктивності простого детандерного циклу q_e від ККД η_e . Незалежною змінною цих цільових функцій був тиск прямого потоку, напрям підвищення якого вказано стрілками. Точками на кривій відмічено положення екстремумів критеріїв. Область компромісу визначається частково кривою ab . Аналогічні криві в просторі критеріїв отримані для простого дросельного циклу.

Розрахунки показують, що для простих циклів криогенної техніки оптимальні параметри двокритеріальної задачі практично не залежать від способу згортання цільових функцій q_e і η_e .

Схожі до отриманих висновків для цільових функцій η_e , E' , E'' є результати аналітичних досліджень взаємозв'язку положення екстремумів ексергетичних втрат і інших енергетичних показників, що випливають з рівняння (1). Основні висновки з них зводяться до:

- положення максимуму E'' та мінімуму D_e , якщо вони існують, не співпадають;
- не можуть бути однаковими будь-які незалежні змінні в точках мінімуму функцій η_e і D_e ;
- в точках екстремумів цільових функцій η_e , E' , D_e усі однойменні параметри повинні відрізнятися.

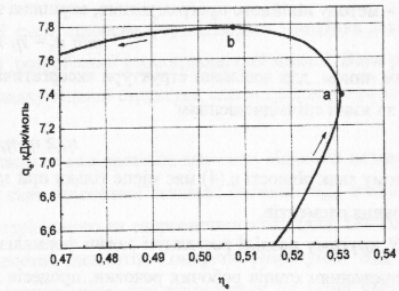


Рис. 1. Залежність між критеріями оптимальності детандерного циклу

Актуальною задачею термодинамічної оптимізації є встановлення взаємозв'язку між ексергетичним ККД системи η_s і її елементів η_k ($k=1, 2, \dots, m$). В загальному випадку така функціональна залежність не може бути встановлена, за виключенням строго послідовного з'єднання. В роботі для довільної структури одержані нерівності, які можуть розглядатися як обмеження на величину η_s . Перше з них має вигляд

$$\eta_s \leq \frac{\sum_i \eta_i E'_i}{\sum_i E'_i}, \quad (2)$$

де підсумовування проводиться для елементів, до яких підводяться ексергетичні потоки з навіколишнього середовища. Таким чином, ексергетичний ККД структури не може перевищувати середнього арифметичного значення ККД елементів, зваженого по величинам ексергетичних потоків, підведених до елементів крізь контрольну поверхню. Зокрема, величина η_s не може бути більшою за максимальне з ККД елемента, до якого підводиться ексергія зовні.

Друга одержана нерівність записується як

$$\eta_s \leq \frac{\sum_i E'_i}{\sum_i E'_i / \eta_i}, \quad (3)$$

де підсумовування проводиться для елементів, від яких відводяться ексергетичні потоки до навіколишнього середовища. Таким чином, ексергетичний ККД структури не може перевищувати середнього гармонічного значення ККД елементів, зваженого по величинам ексергетичних потоків, відведених від елементів крізь контрольну поверхню.

Обмеження (2), (3) дають верхню межу зміні η_s та не конкретизують елементи, що її визначають. В загальному випадку така конкретизація неможлива, але в роботі для деяких структур виявлені елементи, саме розташування яких в схемі обмежує значення η_s .

Для визначення нижньої межі величини η_s в роботі аналітично, з використанням симплекс – методу лінійного програмування, вирішена задача мінімізації. Її результатом є вираз

$$\min \eta_s = \eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_m.$$

Таким чином, для довільної структури ексергетичної ККД системи та її m елементів (підсистем) зв'язані співвідношенням

$$\eta_s \geq \eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_m, \quad (4)$$

причому знак рівності в (4) має місце тільки при $\eta_i = 1, i=1,2,\dots,m$ чи для строго послідовного з'єднання елементів.

У другому розділі розглянуті задачі формалізації термодинамічної системи, пов'язані з моделюванням станів робочих речовин, процесів і схем теплотехнічних установок. Відсутність формалізованого способу відображення схем установок і результатів розрахунків є однією з головних перешкод для створення узагальненого методу структурного аналізу та оптимізації схем.

В дисертації запропоновано розглядати окремі види вузлових точок схеми, які відображають перенос маси робочої речовини (M -точки), а також енергії у формі тепла чи роботи (E -точки). Для кожного виду цих точок виділені їх атрибути.

Зміст поняття вузлової M -точки відображено атрибутами

$$M(P, RM, F, GM),$$

де M – ім'я точки; P – функція, що характеризує її розташування відносно елемента; RM – род робочого тіла; F – масив термодинамічних властивостей; GM – доля (витрата) потоку в перерізі, що відповідає вузловій точці. Функція P приймає наступні значення

$P = +1$, коли точка визначає вхід потоку в елемент;

$P = 0$, коли точка не належить елементу;

$P = -1$, коли точка визначає вихід потоку з елемента.

Поняття вузлової E -точки містить атрибути

$$E(P, RE, GE),$$

де E – ім'я точки; RE – вид енергетичного потоку (теплота, робота); GE – доля (витрата) енергетичного потоку.

У загальному випадку елемент схеми EL задається як об'єднання численностей, що складається з M - та E -точок. В роботі виявлені та розглянуті особливості численностей для основних елементів і схем низькотемпературних систем.

В свою чергу схема теплотехнічної установки SC визначається об'єднанням кінцевих численностей елементів $SC\{EL1, EL2, \dots, ELN\}$, зв'язаних певними відношеннями. До головних відношень включаються умови з'єднання елементів, що можуть бути задані через ідентичні вузлові точки. До ідентичних відносяться однотипні вузлові точки, що мають однакові значення всіх атрибутів за виключенням імен і функцій P .

Для формалізації передбачена уніфікація змісту атрибутів вузлових точок. Зокрема, для масиву термодинамічних властивостей робочих речовин F встановлено визначений порядок.

З метою узагальнення запропоновані правила кодування імен робочих речовин, точок, елементів схеми.

Для структурного аналізу і оптимізації схем створена формалізована методика знаходження кількості незалежних змінних n для розробленої термодинамічної моделі. Вона розглянута для найбільш розповсюдженого випадку заданої структури схеми і відомого робочого тіла.

Реалізація цієї методики дозволила обчислити максимальне значення кількості незалежних змінних n_{max} для окремих елементів та схем криогенної техніки. Значення n_{max} знаходилось з умови врахування тільки рівнянь матеріального та енергетичного балансів, без використання рівнянь процесів та інших особливостей елементів. Конкретні розрахунки n_{max} показали, що оптимізація типових схем криогенних установок відноситься до задач великої розмірності, хоча додаткові обмеження, що звичайно використовуються в їх проектуванні, значно зменшують кількість параметрів оптимізації.

Обґрунтований вибір рівняння стану робочих речовин є одним з важливих моментів при виконанні розрахунків і оптимізації циклів. В зв'язку з постійним впровадженням в низькотемпературну техніку нових робочих тіл, у тому числі багатокомпонентних, в цьому розділі розглянуті питання використання при проектуванні криогенних систем відносно простих єдиних рівнянь стану (ЄРС). До них належать кубічні рівняння стану (КРС) та рівняння стану типу Бенедикта-Веба-Рубіна (БВР).

Порівняння якості опису термічних властивостей речовин для кубічних рівнянь стану Редліха-Квонга (РК) в модифікації Вільсона (РКВ) та Соаве (РКС) показало, що для цих найбільш розповсюджених моделей характерна приблизно однакова погрішність розрахунку термодинамічних властивостей в однофазній області низьких і середніх тисків, а також в умовах парорідинної рівноваги. Проте рівняння РКС дає більш точні дані в області високих температур і тисків.

В роботі виконано зіставлення результатів обчислень простого дросельного циклу за різними моделями ЄРС. Підставою для вибору цього циклу є його мале число параметрів і характерних критеріїв. Точність моделей розраховувалась відносно відповідних величин, одержаних за поліноміальним рівнянням стану В, створеним Васерманом О. А. Для оцінки верхнього порогу погрішності виконувались обчислення з використанням рівняння стану Вандер-Ваальса (ВВ).

В табл. 1 в відсотках наведені погрішності розрахунку основних енергетичних показників циклу на азоті як функцій тиску прямого потоку p_2 . Для рефрижераторного режиму циклу знаходились погрішності питомої холодопродуктивності q_x та ексергетичного ККД η_x для зріджувального режиму – коефіцієнту зрідження x .

З табл. 1 видно, що для кожної моделі існує свій рівень погрішності, який слабо (за виключенням малих значень p_2) залежить від тиску прямого потоку. Для рівнянь РКВ і БВР цей рівень практично однаковий і цілком припустимий для визначення енергетичних показників циклу. Рівняння РКВ має кращі по цим показникам екстраполяційні якості до області висо-

ких тисків, ніж рівняння БВР. Суттєвий вклад у погрішність розрахунку η_c вносить визначення температури охолодження. Так для прийнятого зворотного тиску 0,1 МПа її величина для рівнянь В, РКВ, БВР становить 77,2 К, а для рівняння В – 63,4 К.

Якісно такі ж висновки витікають з виконаних розрахунків ексергетичних втрат від дроселювання та теплообміну в циклі, при визначенні середнього температурного напору в теплообміннику. Отримані результати дають підстави для використання кращих моделей кубічних і типу БВР рівнянь стану при термодинамічних розрахунках і оптимізації циклів криогенної техніки.

Таблиця 1

Погрішності розрахунку енергетичних показників простого дросельного циклу по різним моделям ЄРС

p ₂ , МПа	q _k			x			η _c		
	ВВ	РКВ	БВР	ВВ	РКВ	БВР	ВВ	РКВ	БВР
2	8,6	4,6	-0,5	7,4	5,6	0,0	40,9	3,9	-0,4
4	11,1	3,8	-0,1	9,9	4,9	0,4	44,4	2,8	0,0
6	13,3	3,1	-0,2	12,0	4,2	0,3	47,4	1,7	0,0
8	14,9	2,5	-0,6	13,6	3,5	-0,1	49,8	0,8	-0,4
10	16,1	2,0	-1,3	14,8	3,0	-0,7	51,5	0,0	-1,1
12	16,8	1,6	-2,0	15,5	2,7	-1,5	52,7	-0,5	-1,9
14	17,0	1,5	-2,9	15,7	2,6	-2,4	53,2	-0,9	-2,7
16	16,8	1,6	-3,7	15,5	2,6	-3,2	53,1	-1,0	-3,6
18	16,2	1,9	-4,4	14,9	2,9	-3,9	52,4	-0,9	-4,4
20	15,3	2,4	-5,1	13,9	3,4	-4,6	51,3	-0,6	-5,1

Для трьохпараметричного кубічного рівняння стану розглянуте питання визначення необхідної експериментальної інформації для знаходження такого значення підгінного параметру моделі k , що забезпечить достатню для технічних розрахунків точність. При вирішенні цієї задачі, актуальної при моделюванні малодосліджених речовин, проведені чисельні експерименти з рядом криогенних і холодильних агентів, для яких існують надійні результати з термодинамічних властивостей. Вони базувались на даних з кривих пружності, та їх метою було:

- встановити репрезентативний інтервал для знаходження надійного значення параметру k ;
- виявити з масиву опорних даних оптимальну точечну вибірку та її мінімальний об'єм;
- проаналізувати можливість використання в якості репрезентативної інтервальної вибірки дослідних даних у районі нормальної температури кипіння речовини, де найбільш часто проводяться експериментальні роботи.

Основні висновки з виконаних чисельних експериментів зводяться до наступного:

- найменший внесок в погрішність знаходження параметру k вносять, як правило, дані з навколокритичної області речовини;
- положення на кривій пружності репрезентативного інтервалу по приведеній температурі суттєво залежить від роду робочого тіла;

- для одержання надійного значення параметру k дослідженої моделі достатньо використання чотирьох - п'яти точок в районі нормальної температури кипіння.

У цьому розділі розглянуті особливості критичного стану чистої речовини, що одержані на основі строгих математичних співвідношень і загального термодинамічного підходу.

Узагальнення відомих співвідношень Планка – Гібса для аналітичного рівняння стану $p=p(T,v)$ виконане на базі правила Максвелла. За допомогою методу індукції вони розповсюджені на похідні довільного порядку та деякі ізолії (лінії постійних значень внутрішньої u та вільної f енергії). Отримані рівності мають вигляд

$$\begin{aligned} (d^n p_{sat} / dT^n)^c &= (\partial^n p / \partial T^n)^c_v = (\partial^n p / \partial T^n)^c_s = (\partial^n p / \partial T^n)^c_u = \\ &= (\partial^n p / \partial T^n)^c_h = (\partial^n p / \partial T^n)^c_f, n = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (5)$$

В виразі (5) p, T, v, s, h – відповідно тиск, температура, питомий об'єм, ентропія і ентальпія; індекси sat, c відносять термодинамічну функцію відповідно до насичення та критичного станів.

Аналогічні співвідношення одержані для зворотних похідних

$$\begin{aligned} (d^n T_{sat} / dp^n)^c &= (\partial^n T / \partial p^n)^c_v = (\partial^n T / \partial p^n)^c_s = (\partial^n T / \partial p^n)^c_u = \\ &= (\partial^n T / \partial p^n)^c_h = (\partial^n T / \partial p^n)^c_f, n = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (6)$$

Таким чином критична точка є точкою дотику n -го порядку ($n = 1, 2, \dots$) кривої пружності з ізохорою, ізоентропою, ізоентальпою, а також лініями постійних значень внутрішньої та вільної енергії. Це науковий результат доведений без застосування будь-якої моделі рівняння стану. Тому співвідношення (5), (6) повинні автоматично виконуватись для будь-якого ЄРС в його розрахунковій критичній точці. Останнє, вперше встановлене Васерманом О.А., робить зайвим використання окремого обмеження для правила Планка – Гібса при конструюванні ЄРС для робочих речовин.

Рівності (5) і диференціальні рівняння термодинаміки стали основою для дослідження особливостей ізохорної c_v та ізобарної c_p теплоємкостей речовин в критичному стані. Зокрема для теплоємкості c_v доведена рівність

$$c_v^c \cdot (\partial p / \partial v)_T^c = 0. \quad (7)$$

В критичній точці $c_v^c > 0$, тому з виразу (7) витікає відома перша критична умова (для частинної похідної першого порядку)

$$(\partial p / \partial v)_T^c = 0. \quad (8)$$

Коли навіть $c_v^c \rightarrow \infty$, то з рівняння (7) маємо, що граничне значення невизначеності типу $\infty \cdot 0$ дорівнює нулю.

Для ізобарної теплоємкості отримане співвідношення

$$c_p^c (\partial p / \partial v)_T^c = -T_c^c (dp_{sat} / dT)^{c^2}. \quad (9)$$

Виходячи з експериментальних даних немає сумнівів, що для всіх речовин справедливо

$$(dp_{sat} / dT)^c > 0 \quad (10)$$

та нахил кривої пружності є кінцевим числом. Тому значення невизначеності лівої частини (9) типу $\infty/0$ дорівнює від'ємній скінченій величині.

Використовуючи формулу (9) та диференційні рівняння термодинаміки доведено, що в критичній точці має місце

$$c_v^c \cdot (\partial^2 p / \partial v^2)_T^c = 0, \quad (11)$$

звідки випливає друга критична умова (для частинної похідної другого порядку)

$$(\partial^2 p / \partial v^2)_T^c = 0. \quad (12)$$

Таким чином вперше критичні умови (8), (12) одержані на основі диференційних співвідношень термодинаміки, нерівностей термічної стійкості та правила Планка – Гібса. Це дозволяє стверджувати, що вони мають загальний характер і є справедливими як для різних чистих речовин, так і для різних моделей ЄРС.

Аналогічно з формулою (11) встановлений зв'язок в критичній точці між теплоємністю c_p^c та похідною $(\partial^2 p / \partial v^2)_T^c$, що має вигляд

$$c_p^c \cdot (\partial^2 p / \partial v^2)_T^c = \infty.$$

Останній вираз являє собою ще одну розкрити невизначеність типу $\infty/0$.

Одною з головних проблем критичної точки є розкриття та аналіз виникаючих в ній невизначених форм. Можна умовно виділити два види невизначеностей. Перший обумовлений безмежними чи нульовими значеннями ряду термодинамічних функцій. До нього належать співвідношення наведені вище. Другий виник із-за відсутності математичного апарату для розкриття невизначеностей в відношеннях функцій двох змінних.

В даній роботі розкриті невизначеності, які можуть бути отримані з загальних виразів для різних частинних похідних, зокрема з рівняння

$$\frac{(\partial p / \partial v)_T}{(\partial T / \partial v)_p} = -(\partial p / \partial T)_v. \quad (13)$$

Чисельник та знаменник в лівій частині рівності (13) в критичній точці приймають нульові значення. В той же час права частина цієї рівності, згідно з виразом (10), є ненульовою та скінченною величиною. Ця обставина дозволяє застосувати для розкриття невизначеності $0/0$ в лівій частині відношення (13) розроблений для функцій двох змінних аналог правила Лопітала.

Основні розкриті в роботі невизначеності мають наступний вигляд

$$\frac{(\partial p / \partial v)_T^c}{(\partial T / \partial v)_p^c} = \frac{(\partial^2 p / \partial v^2)_T^c}{(\partial^2 T / \partial v^2)_p^c} = \frac{(\partial^3 p / \partial v^3)_T^c}{(\partial^3 T / \partial v^3)_p^c} = -(\partial p_{sat} / dT)^c;$$

$$\frac{(\partial v / \partial T)_p}{(\partial v / \partial p)_T} = -(\partial p_{sat} / dT)^c, \quad \frac{(\partial^2 v / \partial T^2)_p}{(\partial^2 v / \partial p^2)_T^c} = (\partial p_{sat} / dT)^{c^2};$$

$$\frac{(\partial^2 p / \partial T \partial v)_c}{(\partial^2 T / \partial p \partial v)_c} = -(\partial p_{sat} / dT)^{c^2};$$

$$\frac{(\partial p / \partial v)_T^c}{(\partial p / \partial s)_T^c} = (\partial p_{sat} / dT)^c, \quad \frac{(\partial^2 p / \partial v^2)_T^c}{(\partial^2 p / \partial s^2)_T^c} = (\partial p_{sat} / dT)^{c^2};$$

$$\frac{(\partial p / \partial s)_T^c}{(\partial T / \partial s)_p^c} = \frac{(\partial^2 p / \partial s^2)_T^c}{(\partial^2 T / \partial s^2)_p^c} = -(\partial p_{sat} / dT)^c;$$

$$\frac{(\partial p / \partial h)_T^c}{(\partial T / \partial h)_p^c} = \frac{(\partial^2 p / \partial h^2)_T^c}{(\partial^2 T / \partial h^2)_p^c} = -(\partial p_{sat} / dT)^c;$$

$$\frac{(\partial p / \partial v)_T^c}{(\partial p / \partial h)_T^c} = T_c (\partial p_{sat} / dT)^c, \quad \frac{(\partial^2 p / \partial v^2)_T^c}{(\partial^2 p / \partial h^2)_T^c} = T_c^2 (\partial p_{sat} / dT)^{c^2}.$$

Розкриті невизначені форми використані для доведення еквівалентності існуючих та знаходження нових наборів критичних умов.

В третьому розділі наведені узагальнені алгоритми вирішення ряду термодинамічних задач криогенної техніки, які не залежать від обраного рівняння стану, використовують уніфікований підхід до вибору початкового наближення та забезпечують збіжність процесу обчислень у всій області його застосування.

Перша з них є обчислення термодинамічних функцій парової та рідинної фаз чистих речовин. Вона базується на вирішенні системи рівнянь, що складається з відомих умов термодинамічної рівноваги. На підставі чисельних розрахунків доведено, що для багатоконстантних ЄРС на ізотермі в двохфазній області об'єм як функція тиску може мати більш ніж три корні. Цей факт суттєво підвищує складність задачі через наявність нефізичних коренів системи рівнянь.

В загальному випадку вирази для інтервалів ізоляції об'ємів рідинної v' та парової v'' фаз мають вигляд

$$v_{sp}' \leq v'' \leq RT_{sat} / p_{sat}, \quad (14)$$

$$v_c / d \leq v' \leq v_{sp}', \quad (15)$$

де v_{sp}' , v_{sp}'' – значення питомих об'ємів на спінодалях з боку рідинної та парової фаз; R – універсальна газова стала; $d = 3,5$ – параметр, визначений з експериментальних даних.

Об'єми v_{sp}' , v_{sp}'' обчислюються відповідно як значення глобального мінімуму та найменшого максимуму залежності $p(v, T)$ на ізотермі. Це виконується за допомогою розробленого способу системи стягування створених відрізків до визначеної величини, на кожному з яких проводиться одномірний пошук екстремуму заданих цільових функцій. Після визначення інтервалів ізоляції для об'ємів v' , v'' згідно рівнянь (14) і (15) знаходиться рішення задачі методом січних. Цей алгоритм реалізований для будь-якої незалежної змінної з числа T_{sat} , p_{sat} , v' , v'' .

Розрахунок парорідинної рівноваги для кубічних рівнянь стану, що можна представити у вигляді

$$p = \frac{RT}{b} f(v/b, a(T)/b) \quad (16)$$

може бути суттєво спрощений. До такої форми приводяться, зокрема, рівняння ВВ і РК, а також їх модифікації. У рівнянні (16) через $a(T)$, b – відповідно позначені температурна функція та параметр.

Рівняння стану (16) може бути представлено у безрозмірному вигляді як

$$z_b = f(\varphi, \alpha), \quad (17)$$

де $z_b = p \cdot b / (RT)$, $\varphi = v/b$, $\alpha = a/b$. Для рівняння (17) з умов парорідинної рівноваги витікає, що безрозмірні властивості φ' , φ'' , z_b можуть розглядатися як функції одного аргументу α .

Для основних видів рівняння (16) в алгоритмічній та табличних формах одержані залежності $\varphi'(\alpha)$, $\varphi''(\alpha)$ і $z_b(\alpha)$. Вирішення задачі парорідинної рівноваги у такому вигляді має наступні переваги:

- Результати залежать тільки від форми рівняння стану та не залежать від його модифікації.
- Отримані дані не залежать від роду речовини. Вони можуть бути використані і для сумішей, зокрема, для вибору початкового наближення при розрахунку фазової рівноваги, а також для прогнозування та обчислення азеотропних перетворень.
- Отримані дані можуть бути застосовані для будь-яких правил комбінування параметру b та температурної функції $a(T)$.

В цьому розділі також наведений узагальнений алгоритм обчислення розрахункових значень критичних параметрів ЄРС чистих речовин. Він побудований на аналізі особливостей ліній перегину ізотерм у координатах тиск – об'єм.

Наступна розглянута задача полягає в визначенні агрегатного стану суміші за допомогою максвеловської кривої, що представляє собою геометричне місце точок, розрахованих за правилом Максвелла. В основі запропонованого підходу лежить той факт, що така точка, розглядаючи суміш як чисту речовину, відповідає гетерогенному стану багатокомпонентної системи. Характерні види максвеловських кривих для різних типів фазової рівноваги бінарних сумішей наведені на рис. 2, де ці криві виділені пунктирними лініями, а криві фазової рівноваги – суцільними.

Ця задача виникає при виконанні розрахункових, особливо оптимізаційних, задач низькотемпературної техніки, коли апіорі відомо, що багатокомпонентне робоче тіло знаходиться в гомогенному стані та в той же час рівняння

$$v - v(p, T, z) = 0 \quad (18)$$

має не єдиний корінь. Наведена неоднозначність має місце для аналітичних ЄРС при температурах чи тисках менших своїх псевдокритичних значень, де і виникає ця задача. У рівнянні (18) z – масив валових складів суміші.

Вид агрегатного стану для заданої температури визначається на основі нерівності

$$P_d \leq P_{sm} \leq P_b, \quad (19)$$

де P_d , P_b , P_{sm} – відповідно тиски конденсації, кипіння та розраховані з правила Максвелла. Таким чином, коли задане значення тиску більше ніж P_{sm} , то агрегатний стан суміші відповідає рідині, менше – газу.

Використання максвеловської кривої дає можливість суттєво спростити визначення агрегатного стану суміші, замінивши задачу її фазової рівноваги аналогічно розглянутою раніш задачею для чистої речовини.

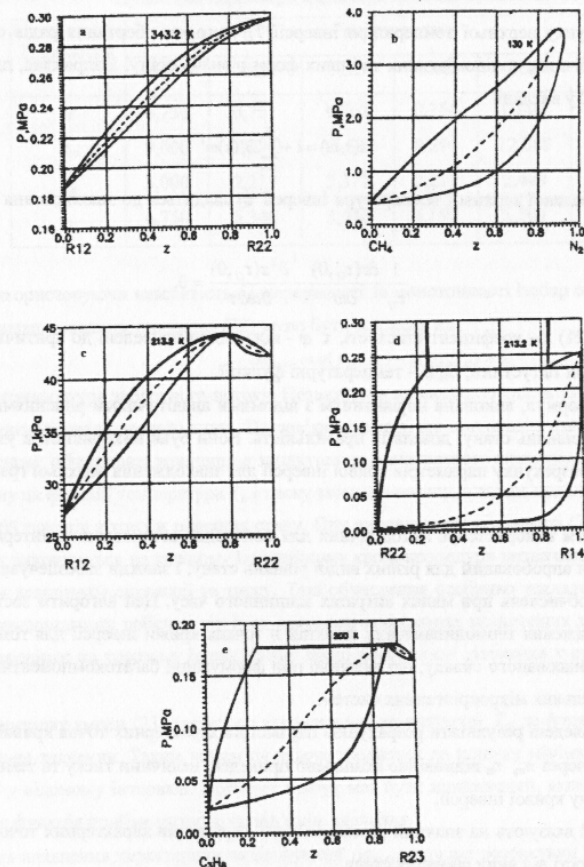


Рис. 2. Криві Максвелла для різних типів фазової рівноваги

Створення наступного узагальненого алгоритму пов'язане з розрахунками параметрів кривої інверсії. Вони займають значне місце серед задач моделювання властивостей і проце-

сів робочих тіл низькотемпературної техніки, зокрема, при пошуку оптимальних параметрів і енергетичних показників дросельних криогенних систем.

В роботі запропоновано визначити криву інверсії не з рівності нулю диференціального дросель – ефекту α_n , а з умови зміни його знаку. Це дозволяє продовжити криву для температур менших, ніж температура нижньої точки інверсії T_L , залишаючи суть процесу дроселювання. Доведено, що при цьому визначенні, для $T < T_L$ крива інверсії співпадає з лінією кипіння.

Для розрахунку верхньої температури інверсії T_U методом обертання рядів одержані формули для кубічних, поліноміальних та інших форм рівнянь стану. Наприклад, для поліноміального ЄРС у вигляді

$$z(\tau, \omega) = 1 + \sum_{i=1}^n B_i(\tau) \omega^i \quad (20)$$

обчислення приведеної верхньої температури інверсії τ_U зводиться до знаходження рішення рівняння

$$\frac{1}{\tau_U} \frac{\partial z(\tau_U, 0)}{\partial \omega} - \frac{\partial^2 z(\tau_U, 0)}{\partial \omega \partial \tau} = 0. \quad (21)$$

У виразах (20), (21) z – коефіцієнт стислості, τ , ω – відповідно приведені до критичних значення температури та густини, $B_i(\tau)$ – температурні функції.

Перевірка формул, виконана порівнянням з відомими аналітичними рішеннями для віриального та ВВ рівнянь стану, довела їх правильність. Вони були використані в узагальненому алгоритмі розрахунку параметрів кривої інверсії для знаходження верхньої границі для температури.

Сам алгоритм використовує метод січних для попереднє встановленого інтервалу ізоляції кореню. Він апробований для різних видів рівнянь стану, і завжди забезпечувалась збіжність процесу обчислень при малих витратах машинного часу. Цей алгоритм застосовано також для знаходження термодинамічних функцій в точках кривої інверсії для гомогенних станів сумішей фіксованого складу, що важливо при формуванні багатокомпонентних робочих тіл для дросельних мікрокриогенних систем.

У табл. 2 наведені результати розрахунків параметрів характерних точок кривої інверсії для азоту. В ній через π_m , τ_m відповідно позначено приведені величини тиску та температури в точці максимуму кривої інверсії.

Дані табл. 2 вказують на значний розкид значень параметрів характерних точок кривої інверсії в залежності від виду рівняння стану.

Наступний алгоритм пов'язаний з визначенням працездатності двопотокового теплообмінного апарату, під якою розуміється принципова можливість практичної реалізації умов на його кінцях, що задовольняють І закону термодинаміки. Ці умови звичайно задаються значеннями температур і тисків робочих тіл. Непрацездатність теплообмінника обумовлена об-

меженням ІІ закону термодинаміки, яке для даної задачі доцільно виразити за Клаузіусом у вигляді нерівності для різниці температур ΔT_{m-n} прямого m та зворотного n потоків

$$\Delta T_{m-n} = T(p_m, q) - T(p_n, q) > 0, \quad (22)$$

де p_m , p_n – відповідно тиск прямого та зворотного потоків, q – теплове навантаження для будь-якого виділеного елемента апарату.

Таблиця 2

Приведені параметри характерних точок кривої інверсії

Параметри	Рівняння стану					
	ВВ	ПК	ПКВ	PKC	БВР	В
τ_L	0,750	0,751	0,762	0,756	0,803	0,803
π_m	9,000	11,040	16,692	8,294	12,089	11,402
τ_m	3,000	2,219	2,377	2,219	2,449	2,053
τ_U	6,750	5,340	3,940	4,197	5,701	4,842

Використовуючи властивість безперервності та монотонності ізобар обох потоків в q, T -координатах доведено, що умова (22) може бути замінена на

$$\Delta q_{m-n} = q(p_m, T_n) - q(p_n, T_n) > 0, \quad (23)$$

де T_n – температура зворотного потоку. Незважаючи на еквівалентність умов (22) і (23), кращим є використання другого з них. Це пов'язане з тим, що при аналізі працездатності апарату на основі обчислення величини q зводиться до однократного знаходження з ЄРС питомого об'єму як функції температури T_n і тиску кожного потоку, а також подальшого розрахунку ентальпій потоків з того ж рівняння стану. При використанні нерівності (22) аналогічні розрахунки виконуються на кожному ітераційному кроці процедури визначення температури по відомим величинам ентальпії та тиску. Такі обчислення особливо ускладнюють задачу для багатокомпонентних робочих тіл із-за наявності додаткових незалежних змінних і необхідності перевірки на кожному ітераційному кроці можливості існування у суміші фазової рівноваги.

Перевірку умови (23) достатньо виконати при температурі T_n , де функція Δq_{m-n} приймає мінімальне значення. Таким чином ця задача зводиться до пошуку мінімуму функції однієї змінної у відомому інтервалі. Причому пошук має бути припинений, якщо на будь-якому кроці ця функція прийме нульове чи від'ємне значення.

Для виявлення характерних видів функції Δq_{m-n} виконані розрахунки простого дросельного циклу на чистих речовинах і сумішах з аналізом q, T -діаграми теплообмінного апарату. У результаті знайдені її чотири типові криві. Аналіз цих кривих показав, що функція Δq_{m-n} може бути монотонною та мати екстремуми. Поява екстремумів зв'язана з фазовими переходами робочого тіла. Коли в обох потоках виникають фазові перетворення, причому температура такого перетворення в зворотному потоці вище, ніж у прямому, то в інтервалі обмеже-

ному цими температурами функція Δq_{m-n} має мінімум. При наявності парорідинної рівноваги лише в одному з потоків у цієї функції спостерігається максимум.

Головний висновок з аналізу кривих $\Delta q_{m-n}(T_n)$ полягає в тому, що у загальному випадку ця функція не є унімодалною, що не дозволяє застосувати до неї прості методи мінімізації. В роботі аналіз працездатності двопотокового теплообмінного апарату проводився з застосуванням методу стягування відрізків.

Самостійною та раніш невирішеною у загальному випадку є задача визначення працездатності багатопотокового теплообмінного апарату. В дисертації запропоновано її рішення з застосуванням узагальненого формулювання II закону термодинаміки, що всякий реальний довільний процес є необоротним. Теплообмінник за своєю суттю є апаратом, тому в ньому можуть протікати тільки довільні процеси. Виходячи з цих положень умова працездатності для багатопотокового теплообмінного апарату може бути сформульована у вигляді: "В будь якому i -му елементі апарату втрати від необоротностей De_i не можуть приймати від'ємних значень".

Таким чином перевірка працездатності зводиться до аналізу виконання нерівностей

$$De_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, r, \quad (24)$$

де r - число елементів апарату. Знак рівності у виразі (24) має лише теоретичне значення, тому що відповідає випадку оборотного процесу теплообміну.

Аналіз працездатності можливо проводити виключивши всі складові ексергетичних втрат, крім втрат від необоротного теплообміну між потоками. Така ідеалізація зменшує величину De_i , таким чином ослаблюючи нерівності (24). І коли при цьому ці нерівності будуть виконуватись, то теплообмінник треба вважати працездатним.

Безпосереднє використання нерівностей (24) передбачає розрахунки ексергетичних втрат для кожного елемента i є не зовсім зручним з ряду причин. Уникнути цього можна, розглядаючи працездатність не кожного, а k ($k=0, 1, \dots, r$) елементів. Вибір початкового елемента може формально проводитись з будь-якого кінця апарату. При такому підході нерівності

$$De_k > 0, k = 1, 2, \dots, r,$$

де De_k - ексергетичні втрати для k елементів, вже не визначають умови працездатності. Як доведено в роботі, вони можуть бути замінені на

$$dDe_k / dQ > 0 \quad (25)$$

для будь-якого Q . У виразі (25) через Q позначена незалежна змінна, що однозначно визначає термодинамічні функції в перерізі апарату. Таким чином поелементні розрахунки в цій задачі замінюються на дослідження знаку першої похідної функції однієї змінної $De_k(Q)$.

Перевірка запропонованого підходу аналізу працездатності багатопотокових апаратів виконана проведенням чисельних експериментів на двопотокових теплообмінниках, для яких визначені критерії працездатності і є можливість змоделювати різні варіанти теплообміну між потоками. Її результати наведені на рис. 3. На ньому через q, d відповідно позначені пи-

томі (віднесені до витрат прямого потоку) значення теплового потоку і ексергетичних втрат. Кожний з графіків рис. 3 містить відому q, T -діаграму і залежність $d(q)$, яка по аналогії названа q, d -діаграмою.

З наведених графіків тільки рис. 3а відповідає працездатному теплообмінному апарату. У цьому випадку для кожного q має місце $T_m > T_n$, а функція $d(q)$ є монотонно зростаючою.

Рис. 3б характеризує наявність процесу оборотного теплообміну в перерізі апарату. Цей переріз визначається точкою дотику кривих $T_m(q)$ і $T_n(q)$, а також точкою згину функції $d(q)$.

На рис. 3с відображений випадок порушення умов працездатності апарату в його середній частині, де $T_m(q) < T_n(q)$. При виконанні останньої нерівності функція $d(q)$ є монотонно убыває, що відповідає $dd(q)/dq < 0$. В точках перетину кривих $T_m(q)$ і $T_n(q)$ має місце оборотний теплообмін. У них функція $d(q)$ приймає екстремальні значення.

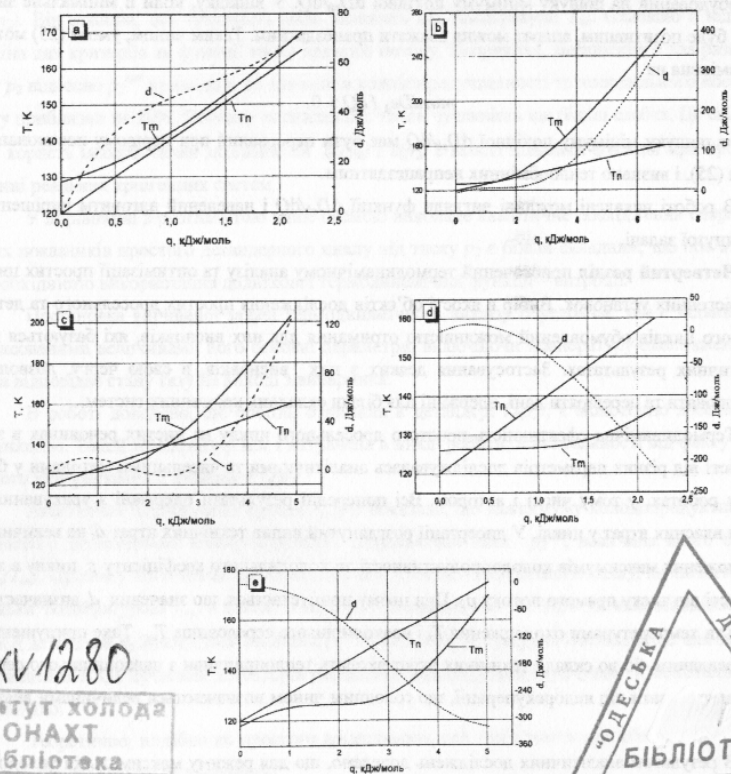


Рис. 3. Види q, T - і q, d -діаграм

xv1280
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА
БІБЛІОТЕКА
АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

Порушення умови працездатності теплообмінника, що відповідає рис. 3d, відбувається в верхній частині апарату. Тут характерними особливостями функції $d(q)$ є наявність максимуму в точках перетину кривих $Tm(q)$ і $Tn(q)$, а також її монотонне зростання в області, визначеної нерівністю $Tm(q) < Tn(q)$. В цій області величина ексергетичних втрат має від'ємні значення.

Рис. 3е відображає граничний випадок, коли умова порушується в кожному перерізі апарату. При цьому ексергетичні втрати монотонно зростають в залежності від q , залишаючись всюди від'ємними, за виключенням початкової точки.

Головний висновок, який витікає з аналізу рис. 3, полягає в тому, що використання в якості критеріїв працездатності двофазових теплообмінників співвідношень (22) і (25) приводить до однакових якісних і чисельних результатів.

Алгоритм вирішення задачі визначення працездатності багатопотокових теплообмінників побудований на пошуку мінімуму похідної dDe/dQ . У випадку, коли її мінімальне значення буде позитивним, апарат можна вважати працездатним. Таким чином, умова (25) може бути змінена на

$$\min dDe_k / dQ > 0.$$

Процес пошуку мінімуму похідної dDe/dQ має бути перерваний при першому невиконанні умови (25), і визнано теплообмінник непрацездатним.

В роботі виявлені можливі вигляди функції dDe/dQ і наведений алгоритм вирішення розглянутої задачі.

Четвертий розділ присвячений термодинамічному аналізу та оптимізації простих циклів кріогенних установок. Вибір в якості об'єктів дослідження простих дросельного та детандерного циклів обумовлений можливістю отримання для них висновків, які базуються на аналітичних результатах. Застосування деяких з цих висновків, в свою чергу, дозволяє осмислювати та перевіряти дані, одержані для більш складних кріогенних систем.

Термодинамічна ефективність простого дросельного циклу на чистих речовинах в залежності від різних параметрів досліджувалась аналітичними та чисельними методами у багатьох роботах, у тому числі і автором. Всі попередні результати одержані з урахуванням тільки власних втрат у циклі. У дисертації розглянутий вплив технічних втрат d_i на величину та положення максимумів холодопродуктивності та холодильного коефіцієнту ε циклу в залежності від тиску прямого потоку p_2 . При цьому припускається, що значення d_i визначається тільки температурами охолодження T_x і навколишнього середовища T_{oc} . Таке припущення є виправданим, бо до складу технічних втрат входять теплопритоки з навколишнього середовища та втрати від недорекуперації, що головним чином визначаються величинами вказаних температур.

В результаті аналітичних досліджень доведено, що для режиму максимальної холодопродуктивності оптимальний тиск p_2^{opt} не залежить від значення d_i і співпадає з тиском інвер-

сії p_{in} при температурі T_{oc} . В той же час наявність технічних втрат приводить до зменшення максимальної холодопродуктивності на величину d_i .

Встановлено, що для режиму максимальної енергетичної ефективності тиск p_2^{opt} задовольняє нерівності

$$p_{in}(T_{oc}) \geq p_2^{opt}(d_i) \geq p_2^{opt}(0).$$

Найбільше значення, яке може приймати втрати d_i дорівнює інтегральному ізотермічному дроселю – ефекту на рівні температури навколишнього середовища $\Delta h_{T_{oc}}$. В цьому випадку p_2^{opt} буде співпадати з $p_{in}(T_{oc})$, але йому відповідає нульове значення ε . Підвищення оптимального тиску прямого потоку з ростом технічних втрат можна умовно трактувати як намагання компенсувати це зростання за рахунок додаткових витрат енергії.

У зв'язку з наближеним характером математичної моделі дросельного циклу, а також великими значеннями тисків проведений аналіз чутливості оптимуму для критеріїв $q_x(p_2)$ і $\varepsilon(p_2)$. Він показав, що чутливість мало залежить від температури T_{oc} . Слабкою є відносна зміна цих критеріїв як функції тиску прямого потоку. Наприклад, зменшення в два рази тиску p_2 відносно p_2^{opt} приводить до зниження холодопродуктивності та холодильного коефіцієнту приблизно на 20%. Поблизу оптимальних точок чутливість ще більш слабка. Це свідчить на користь використання залежностей $q_x(p_2)$ і $\varepsilon(p_2)$ в якості цільових функцій при проектуванні реальних кріогенних систем.

У порівнянні з розглянутою вище схемою виконане аналітичне дослідження енергетичних показників простого детандерного циклу від тиску p_2 є більш складним, що пов'язано з необхідністю використання додаткової термодинамічної функції – ентропії.

Постановка вирішеної задачі термодинамічного аналізу передбачає, що є заданими та фіксованими величинами його основні параметри, включаючи температуру охолодження T_x , яка відповідає стану газу на виході з випарника.

В роботі доведено, що робота, отримана в детандері $l_d(p_2)$, є монотонно зростаючою функцією. Такий же характер має і витрачена в циклі робота, в незалежності від факту корисного використання її складової $l_d(p_2)$.

Аналітичне дослідження функції $q_x(p_2)$ показало, що максимуму холодопродуктивності простого детандерного циклу відповідає оптимальний тиск p_2^{opt} , величина якого більше $p_{in}(T_{oc})$. Причому його значення, на відміну від простого дросельного циклу, визначається не тільки температурою T_{oc} , а також тиском p_1 і температурою T_x . При зменшенні адіабатного ККД детандера η_s знижується величина p_2^{opt} . Конкретні розрахунки показали, що для значень адіабатних ККД сучасних детандерів реально функцію $q_x(p_2)$ можна вважати монотонно зростаючою.

Теоретично, подібно до простого дросельного, цей цикл також має область працездатності, що визначається нерівністю

$$\eta_s > -\Delta h_{T_{oc}} / l_{d_i},$$

де l_{ds} - робота, отримана в ідеальному детандері. Розрахунки простого детандерного циклу довели, що остання нерівність може порушуватися для низькотемпературних речовин при малих тисках прямого потоку та високих температурах навколишнього середовища.

Більш складною, ніж для попередньо розглянутих енергетичних показників циклу, є залежність холодильного коефіцієнту $\varepsilon(p_2)$. Апалітично показано, що при прямуванні $p_2 \rightarrow p_1$, а також вважаючи ідеальними газом робоче тіло та ідеальним процес у детандері, функція $\varepsilon(p_2)$ має максимум, величина якого дорівнює холодильному коефіцієнту циклу Карно. При врахуванні реальності процесу розширення газу за допомогою адіабатного ККД η_s , інших технічних втрат в циклі ця функція теж має максимум, але менший ніж ε_K . Коли отримана в детандері робота корисно не використовується,

$$\lim_{p_2 \rightarrow p_1} \varepsilon = \frac{T_x}{T_{oc}}.$$

При високих значеннях тиску p_2 досліджуваний холодильний коефіцієнт, подібно до простого дросельного циклу, також має максимум, що задовольняє нерівності $\varepsilon < \varepsilon_K$. З цього факту витікає, що функція $\varepsilon(p_2)$ повинна мати мінімум, розташований між двома максимумами. Наведені на рис. 4 та інші дані виконаних чисельних експериментів підтверджують отримані якісні результати.

Задача обчислення граничних величин q_x і ε вирішена для дросельного рефрижераторного циклу з власними втратами від необоротностей, вважаючи заданими параметри p_1, T_x , а незалежною змінною p_2 . Для використаної моделі ізотермічного стиску БРТ у компресорі приймалось обмеження на його сухий хід.

Область можливих значень тиску p_2 , в якій необхідно шукати рішення задачі, обмежена кривими, наведеними в приведених координатах на рис. 5. Вони побудовані на основі розрахунків для азоту з використанням поліноміального ЄРС.

Крива інверсії 1 є геометричним місцем точок для режиму максимальної холодопродуктивності, а лінія 2 визначає точки, які відповідають режиму максимального значення холодильного коефіцієнту. Номером 3 і символом К позначені відповідно крива пружності та критична точка.

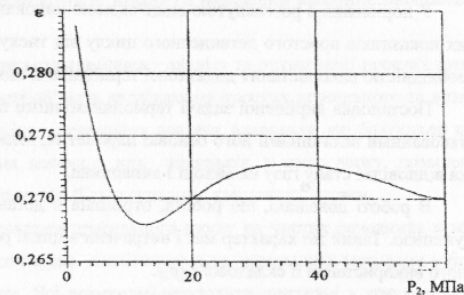


Рис. 4. Залежність холодильного коефіцієнту простого детандерного циклу на азоті від тиску p_2 ($p_1=0,1$ МПа, $T_x=120$ К, $T_{oc}=300$ К, $\eta_s=1,0$)

З монотонного характеру зменшення q_x і ε як функцій температури T_{oc} витікає, що шукані граничні значення повинні лежати відповідно на кривих 1 і 2 зліва від їх точок максимумів. Маючи на увазі обмеження на сухий хід компресора, доведено, що ці значення визначаються точками перетину ліній 1 і 2 з ізотермою $\tau=1$.

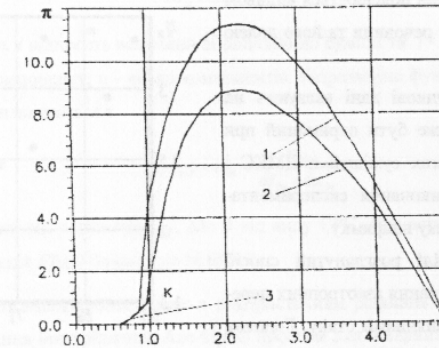


Рис. 5. Характерні криві для простого дросельного циклу

Використання існуючої приблизної термодинамічної подібності між речовинами дало можливість виконати оцінку граничних енергетичних показників простого дросельного циклу на будь-якому робочому тілі, включаючи БРТ. При однакових приведених значеннях тисків зворотного π_1 , прямого π_2 та температури навколишнього середовища T_{oc} з безрозмірних виразів для енергетичних характеристик термодинамічно подібних робочих тіл випливає

$$\tilde{q}_x(\pi_1, \pi_2, T_{oc}) = idem; \quad \tilde{l}(\pi_1, \pi_2, T_{oc}) = idem; \quad \varepsilon(\pi_1, \pi_2, T_{oc}) = idem;$$

де $\tilde{q}_x = q_x / (RT_c)$, $\tilde{l} = l / (RT_c)$, l - питома ізотермічна робота стиску.

Існування однакових приведених граничних енергетичних характеристик циклу для всіх робочих речовин передбачає, що криві 1 і 2 на рис. 5 повинні описуватися в безрозмірних координатах рівняннями, які не містять індивідуальних констант речовин. Ця вимога, як доведено в роботі, виконується.

Чисельні експерименти з чистими робочими речовинами та сумішами підтвердили можливість застосування методу термодинамічної подібності для вирішення поставленої задачі. Розрахунки, виконані на азоті для нормальної температури кипіння, показали, що граничні енергетичні показники циклу становлять $\tilde{q}_x=3,86$, $\varepsilon=0,97$. Найбільше значення ексергетичного ККД, отримане на основі правила Гульдберга, дорівнює приблизно 0,6.

В цьому розділі також представлені результати теоретичного пошуку азеотропних робочих речовин ДМКС з застосуванням створеного методу максвеловських кривих. Для азо-

тих температур на рис. 6 показані результати обчислень приведеної холодопродуктивності циклу ДМКС з власними втратами. У даному випадку величина $\tilde{q}_x$ являє собою відношення холодопродуктивностей циклів на азеотропних сумішах на основі азоту і на чистому азоту при однакових T_{oc} , p_1 , p_2 . Розрахунки виконані при $T_{oc}=300$ K, $p_1=0,1$ МПа, $p_2=2$ МПа. Температура охолодження T_x дорівнює температурі насичення при тиску p_1 .

З рис. 6 видна незвична тенденція підвищення холодопродуктивності циклу при зниженні температури T_x , що пояснюється впливом доданого до азоту роду речовини та його долею в суміші.

Отримані розрахункові дані вказують на значний ефект, що може бути отриманий при використанні азеотропних сумішей в ДМКС і дають підстави для виконання експериментальних досліджень у цьому напрямку.

У п'ятому розділі розглянутий спосіб розрахунку та прогнозування азеотропних перетворень за єдиними рівняннями стану. Головна перешкода в застосуванні ЄРС для знаходження точок азеотропу полягає в необхідності обчислення парорідинної рівноваги суміші. Цієї трудомісткої процедури вдається уникнути, використовуючи наведений далі метод, який фактично приводить до заміни багатокомпонентної системи на псевдочисту речовину. Реалізація цього методу дозволяє виконати комплексні дослідження для пошуку азеотропних сумішей та моделюванню їх термодинамічних властивостей на базі різних форм ЄРС.

В основі запропонованого методу лежить відзначений раніше факт, що максвелівська крива належить області гетерогенних станів суміші. Тому, виходячи з теореми Гібса – Коновалова, можна стверджувати, що в точці азеотропа ця крива має глобальний екстремум. Виконані розрахунки на бінарних сумішах, частина з яких відображена на рис. 2, показують, що при фіксованій температурі тиск на максвелівській кривій як функція складу в звичайній та гетероазеотропній точці має єдиний екстремум. Останній висновок не розповсюджується на рідкий випадок подвійних азеотропів. Таким чином для бінарних систем задача зводиться до дослідження функції однієї перемінної, за звичай складу суміші, у відомому діапазоні його зміни.

У подальшому розглядаються дві відносно самостійні задачі, пов'язані з даною проблемою. Перша полягає в прогнозуванні азеотропних перетворень, і головний інтерес вона викликає при плануванні експерименту для пошуку нових перспективних робочих тіл низькотемпературної техніки. Її мета – встановити факт наявності точок екстремуму максвелівської кривої. Змістом другої задачі є визначення характеристик азеотропних точок, таких як тем-

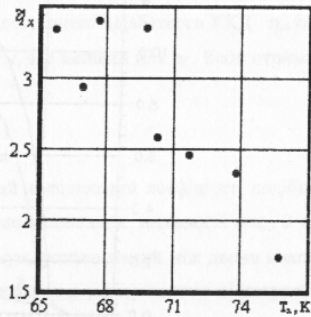


Рис. 6. Приведена холодопродуктивність ДМКС на азеотропних сумішах

пература, тиск, склад суміші та інших. Вона зокрема виникає при знаходженні параметрів рівняння стану з дослідних даних по азеотропним сумішам.

Перша задача вирішувалась на базі двохпараметричних кубічних рівнянь стану, які можуть бути представлені у формі (17). З аналітичних досліджень показано, що для ЄРС (17) необхідні умови існування азеотропії мають вигляд

$$\frac{\partial a_m}{\partial b_m} \frac{\partial x_i}{\partial x_i} = F(\alpha_m), \quad i=1,2,\dots,n-1. \quad (26)$$

де нижні індекси m , i відносять величини відповідно до суміші та i -го компоненту; x_i – мольна доля i -го компоненту; n – число компонентів. Безрозмірна функція $F(\alpha_m)$, що входить до рівняння (26), визначається з

$$F(\alpha_m) = \alpha_m + \frac{z_{hs}}{dz_{hs}/d\alpha_m}$$

і залежить не тільки від параметру α_m , але й від виду ЄРС. Для всіх досліджених кубічних рівнянь стану функція $F(\alpha_m)$ близька до лінійної.

Прогнозування азеотропних станів з використанням рівняння (26) полягає в встановленні факту існування його рішення. Але більш простим для бінарних сумішей є спосіб порівняння знаків похідної тиску на максвелівській кривій від складу на межі чистих компонентів (запропоновано В.М. Тараном). Він використовувався для пошуку можливих азеотропних перетворень серед бінарних сумішей, утворених 15 чистими речовинами, які застосовуються в криогенній та холодильній техніці. Мета пошуку – дослідження впливу форми ЄРС та правил комбінування їх параметрів на прогнозування азеотропних станів.

В процесі обчислювальних експериментів приймалися розповсюджені правила комбінування параметрів ЄРС b_m , a_m

$$\begin{aligned} b_m &= b_1x + b_2(1-x), \\ a_m &= a_{11}x^2 + 2a_{12}x(1-x) + a_{22}(1-x)^2 \end{aligned} \quad (27)$$

без залучення емпіричних кореляцій для параметру різнорідної взаємодії a_{12} . Для нього аналізувались два варіанти визначення

$$a_{12} = \sqrt{a_{11} \cdot a_{22}}, \quad (28)$$

$$a_{12} = (a_{11} + a_{22})/2. \quad (29)$$

В останніх виразах параметри a_{11} , a_{22} характеризують чисті речовини. Таким чином задача прогнозування вирішувалась для найбільш привабливого випадку – на основі даних тільки для чистих компонентів.

Статистичні результати прогнозування азеотропних перетворень при фіксованому тиску 0,1 МПа наведені в табл. 3. В її комірці міститься число співпадаючих азеотропних сумішей, що прогнозуються двома різними чи одним (в діагональних комірках) рівняннями ста-

ну. Аналіз даних табл. 3 вказує на більшу залежність результатів від обраного правила комбінування, ніж від виду ЄРС.

Виходячи з експериментально обгрунтованої частоти існування азеотропних сумішей, можна припустити про перевагу використання рівності (28) перед співвідношенням (29). Також необхідно відмітити, що для кожного з розглянутих ЄРС заміна правила (28) на (29) просто приводить до зменшення числа прогнозованих азеотропов без додання нових таких сумішей.

З метою перевірки можливості застосування моделі РКВ і правил комбінування (28) для прогнозування нових перспективних робочих тіл дросельних мікроохолоджувачів виконано пошук азеотропов при тиску 0,1 МПа. Він проводився для всіляких бінарних систем, складених з 35 індивідуальних речовин.

Таблиця 3

Прогнозування азеотропних сумішей на базі кубічних рівнянь стану

Рівняння стану	Правила комбінування					
	Співвідношення (28)			Співвідношення (29)		
	ПР	РКВ	ВВ	ПР	РКВ	ВВ
ПР	46	42	40	22	17	18
РКВ	42	44	39	17	18	16
ВВ	40	39	56	18	16	28

Частотність появи азеотропних систем у модельних розрахунках дорівнює приблизно 54%, що відповідає дослідним даним для області помірних чи високих температур. З всього дослідженого набору тільки гелій, як показують обчислення, не створює ні одної азеотропної суміші.

Порівняння одержаних і експериментальних даних виконане за ознакою наявності чи відсутності азеотропії для 43 систем. Їх збіг мав місце для 37 сумішей. З розбіжних результатів у 5 випадках прогнозувались експериментально спростовані азеотропні перетворення, а в одному (R12+R152) розрахунки не показали встановленого дослідом факту наявності азеотропного стану.

В цілому рівень вірного прогнозування слід вважати цілком задовільним, що дає підстави рекомендувати рівняння стану РКВ і правила комбінування (28) для планування експерименту по пошуку азеотропних сумішей.

Задача моделювання термодинамічних властивостей робочих тіл в азеотропному стані полягала в знаходженні з дослідних даних параметру c_{12} в правилі комбінування (27) для a_m . Параметр c_{12} вводився згідно виразу

$$a_y = (1 - c_y) \sqrt{a_a a_{jj}}; i = 1, 2, j = 1, 2;$$

де

$$c_y = 0, \quad i = j; \quad c_y = c_{ji}, \quad j \neq i.$$

Значення цього параметру для розповсюджених сумішей холодильних агентів наведені в табл. 4. Його обчислення проводилось на базі експериментальних даних з температури і мольного складу в точках азеотропів, опублікованих в монографії Томановської В.Ф. і Колодоті Б.Е. Відсутність в ній дослідних величин тисків не дала можливості оцінити погрішність виконаних розрахунків. Тому в табл. 4 представлені лише розрахункові значення тисків p_{az} .

Таблиця 4

Результати моделювання азеотропних сумішей холодильних агентів

Суміш	Експеримент		Параметр c_{12}			p_{az} , МПа		
	x	T, K	ПР	РКВ	ВВ	ПР	РКВ	ВВ
R12 – R 152a	0.61	239.8	0.090	0.094	-0.028	0.11	0.11	0.43
R23 – R13	0.50	184.8	0.014	-0.126	-0.506	0.07	0.05	0.14
R115 – R22	0.35	227.5	0.028	0.061	0.115	0.09	0.10	0.62
R32 – R115	0.73	215.9	0.060	0.090	0.162	0.08	0.09	0.69
R115 – R152a	0.69	229.6	0.100	0.082	0.016	0.09	0.08	0.42
R115 – C ₃ H ₈	0.38	226.6	0.078	0.122	0.043	0.10	0.17	0.45
R22 – R12	0.85	213.1	0.043	0.039	0.058	0.04	0.04	0.35
	0.89	233.1	0.043	0.040	0.054	0.11	0.11	0.58
	0.93	253.1	0.043	0.041	0.050	0.25	0.25	0.90

Аналіз даних табл. 4 показує, що значення параметру c_{12} суттєво залежить від форми ЄРС, хоча для рівнянь ПР, РКВ і деяких сумішей їх величини близькі між собою. Рівняння стану ВВ, не дивлячись на задовільні прогностичні якості, не в змозі адекватно описати тиски в азеотропній точці, про що свідчать їх нереальні значення в табл. 4. В той же час рівняння ПР і РКВ дають в основному приблизно однакові значення p_{az} .

Для суміші R22 – R12 та рівнянь ПР, РКВ параметр c_{12} є практично сталою величиною, що дає підстави рекомендувати його для розрахунків азеотропних станів цієї суміші в широкому діапазоні температур і складів.

ВИСНОВКИ

1. Аналітично встановлені взаємозв'язки між ексергетичним ККД системи та її підсистем зменшують можливий діапазон зміни ККД системи, що веде до спрощення проектних досліджень при аналізі альтернативних варіантів схем теплотехнічних установок.
2. Запропонована класифікація вузлових точок, їх ознак, а також уніфікація імен елементів криогенних систем і методів їх термодинамічних розрахунків сприяє розробці ефективних формалізованих алгоритмів розрахунку та аналізу схем низькотемпературних установок.

3. Отримані аналітичні співвідношення для обчислення верхньої температури інверсії речовин можуть бути використані для розробки узагальнених алгоритмів розрахунку параметрів кривої інверсії та аналізу якості рівнянь стану.
4. Запропонована методика аналізу підгінного параметру кубічного рівняння стану (КРС) з даних по парорідинній рівновазі дає можливість оцінити мінімальний об'єм експериментальної інформації, необхідний для моделювання термодинамічних властивостей малодосліджених речовин. Виконаний аналіз для трьохпараметричного КРС показав, що для отримання надійного значення цього параметру достатньо використати чотири - п'ять точок кривої пружності в районі нормальної температури кипіння.
5. Для будь-якого єдиного рівняння стану його критична точка є точкою дотику n -го порядку ($n = 1, 2, \dots$) кривої пружності з ізохорою, ізентропою, ізоентальпою, а також лініями постійних значень внутрішньої та вільної енергії. Цей результат може розглядатися як розвиток і узагальнення відомого правила Планка - Гібса.
6. Різні набори критичних умов для чистих речовин можуть розглядатися як наслідок невизначених форм, які мають місце в критичній точці. Цей висновок дав змогу виявити нові набори критичних умов.
7. Аналітично доведено, що відомі критичні умови можуть бути отримані на основі диференціальних рівнянь термодинаміки, умов термічної сталості та правила Планка - Гібса. Цей результат свідчить на користь припущення про значущість в критичній точці варіацій термодинамічного потенціалу включно до другого порядку.
8. Припущення про термічну сталість критичного стану чистих речовин та про те, що коефіцієнт Ріделя є скінченною величиною більшою за одиницю є необхідними та достатніми умовами для розкриття ряду невизначених форм, що мають місце в критичній точці.
9. Ізотерми всіх відомих форм єдиних рівнянь стану мають в навоколкритичній області парорідинної рівноваги якісно аналогічний вигляд з ізотермами ван-дер-Ваальсовського газу. Цей висновок, одержаний на основі чисельних експериментів, дає змогу спростити алгоритм знаходження розрахункових критичних параметрів єдиних рівнянь стану.
10. Отримані для двохпараметричних КРС безрозмірні значення об'ємів співіснуючих фаз і деяких інших термодинамічних функцій визначаються тільки формою рівняння стану і не залежать ні від його модифікації, ні від роду речовини. Цей аналітичний результат дозволяє визнати, що будь-яка модифікація двохпараметричного КРС не приводить до покращення опису парорідинної рівноваги. Крім того, він дозволив створити універсальні алгоритми розрахунку парорідинної рівноваги для різних видів КРС.
11. Запропонований спосіб умовної розбивки двопотокового теплообмінника по температурі зворотного потоку зменшив діапазон аналізованих температур і суттєво спростив алгоритм визначення працездатності апарату.
12. Аналіз працездатності теплообмінника може бути проведений перевіркою знаків похідної ексергетичних втрат по змінній, що однозначно визначає термодинамічні функції робочих речовин в перетині апарату. Якщо ця похідна в кожному перетині позитивна, то теп-

лообмінний апарат є працездатним. У випадку від'ємного значення похідної в будь-якому перетині теплообмінник визнається непрацездатним.

13. Із виконаних аналітичних і чисельних досліджень витікає, що холодильний коефіцієнт простого детандерного циклу є полімодальною функцією тиску прямого потоку, глобальний максимум якої спостерігається при наближенні тиску прямого потоку до тиску зворотного потоку. Величина глобального максимуму для випадків ідеального детандеру та ідеального газового робочого тіла дорівнює холодильному коефіцієнту зворотного циклу Карно.
14. Використання методу термодинамічної подібності речовин дало змогу встановити, що найбільше значення приведенної питомої холодопродуктивності ступені охолодження простого дросельного циклу на будь-якому робочому тілі, включаючи суміші, не може перевищувати значення приблизно рівного 3,9.
15. Результати прогнозування й моделювання азеотропних перетворень в бінарних сумішах, виконані на основі запропонованого методу максвеловських кривих, дозволяють проводити планування експерименту для пошуку ефективних робочих тіл дросельних мікрокриогенних систем.

Головний зміст дисертації опубліковано в роботах:

1. Лавренченко Г.К., Троценко А.В. Исследование оптимальных параметров рефрижераторного цикла Линде // Холодильная техника и технология. - 1976, вып. 23, с.54-58.
2. Лавренченко Г. К., Троценко А. В. Определение максимума термодинамической эффективности цикла Линде // Известия вузов СССР - Энергетика. - 1976, № 11, с. 87 - 92.
3. Лавренченко Г. К., Троценко А. В. Анализ термодинамической эффективности цикла Линде на смесях веществ // Известия вузов СССР - Энергетика. - 1980, № 8, с. 71 - 76.
4. Лавренченко Г. К., Троценко А. В., Валякин В. Н., Анисимов В. Н., Сысоев А. М., Табачник Э. И. Энергетические характеристики рефрижераторного цикла Линде на бинарных смесях // Холодильная техника и технология. - 1981, вып. 32, с. 59 - 65.
5. Лавренченко Г. К., Троценко А. В. О формировании смесей веществ для дросельных рефрижераторных систем // Холодильная техника и технология. - 1981, вып. 32, с. 65 - 69.
6. Лавренченко Г. К., Троценко А. В. Термодинамическая эффективность дросельного цикла на многокомпонентных рабочих телах // Холодильная техника и технология. - 1981, вып. 33, с. 47 - 50.
7. Рувинский Г. Я., Лавренченко Г. К., Троценко А. В. Метод термодинамического расчета элементов криогенных установок // Холодильная техника и технология. - 1981, вып. 33, с. 43 - 46.
8. Рувинский Г. Я., Лавренченко Г. К., Троценко А. В. Расчет фазового равновесия жидкость - пар по кубическим уравнениям состояния // Холодильная техника и технология. - 1982, вып. 35, с. 94 - 96.
9. Лавренченко Г. К., Троценко А. В., Табачник Э. И., Баклан О.В. Обобщенный алгоритм определения критических параметров чистых веществ на основе единых уравнений состояния // В кн. "Пути автоматизации электробытовых машин и приборов". Киев.: Техника, 1982, с. 17 - 19.
10. Лавренченко Г. К., Троценко А. В., Табачник Э. И., Рувинский Г. Я., Валякин В. Н., Балабайченко В. И. Исследование фазовых равновесий в бинарных смесях с ограничено

- смешивающимися компонентами // Холодильная техника и технология. – 1983, вып. 37, с. 38 – 44.
11. Лавренченко Г. К., Рувицкий Г. Я., Табачник Э. И., Троценко А. В. Определение параметра разнородного взаимодействия уравнения Редлиха – Квонга – Вильсона для смесей холодильных агентов // Холодильная техника и технология. – 1983, вып. 37, с. 44 – 47.
 12. Лавренченко Г. К., Табачник Э. И., Троценко А. В. Метод расчета фазового равновесия жидкость – пар чистых веществ // Теплофизические свойства веществ и материалов / ГСССД, 1983, вып. 18, с. 41 – 46.
 13. Додельцева Н.И., Лавренченко Г.К., Рувицкий Г.Я., Табачник Э. И., Троценко А. В. Расчет и анализ q , T – диаграммы двухпоточного теплообменника на многокомпонентных рабочих телах // Холодильная техника и технология. – 1984, вып. 39, с. 61 – 65.
 14. Табачник Э. И., Троценко А. В. Обобщенный алгоритм расчета кривой инверсии холодильных агентов // Холодильная техника и технология. – 1985, вып. 40, с. 58 – 62.
 15. Лавренченко Г.К., Анисимов В.Н., Додельцева Н.И., Рувицкий Г.Я., Табачник Э. И., Троценко А. В. Обобщенные алгоритмы расчета термодинамических свойств чистых фреонов и их смесей // Теплофизические свойства веществ и материалов / ГСССД, 1984, вып. 20, с. 33 – 55.
 16. Рувицкий Г. Я., Табачник Э. И., Троценко А. В. Метод вычисления плотности веществ по единому уравнению состояния при независимых переменных температуре и давлении // Теплофизические свойства веществ и материалов / ГСССД, 1985, вып. 22, с. 134 – 140.
 17. Троценко А. В., Табачник Э. И. Расчет q , T – диаграммы двухпоточного теплообменника // Холодильная техника и технология. – 1985, вып. 41, с. 33 – 36.
 18. Троценко А. В. Исследование влияния технических потерь на оптимальные параметры дроссельного рефрижераторного цикла // Холодильная техника и технология. – 1985, вып. 41, с. 89 – 92.
 19. Троценко А. В., Табачник Э. И. Метод анализа q , T – диаграммы двухпоточного теплообменника // Инженерно – физический журнал, 1986, т.1, № 1, с. 138 – 139.
 20. Троценко А. В., Табачник Э. И. Определение предельной термодинамической эффективности дроссельного рефрижераторного цикла // Холодильная техника и технология. – 1987, вып. 44, с. 65 – 69.
 21. Троценко А. В. Исследование теоретической холодопроизводительности простого детандерного цикла // Холодильная техника и технология. – 1987, вып. 45, с. 18 – 21.
 22. Троценко А. В. Анализ взаимного положения экстремумов критериев термодинамической эффективности циклов // Холодильная техника и технология. – 1988, вып. 46, с. 44 – 46.
 23. Троценко А. В., Табачник Э. И. Определение вида агрегатного состояния многокомпонентных систем // Холодильная техника и технология. – 1988, вып. 47, с. 23 – 26.
 24. Табачник Э. И., Таран В. Н., Троценко А. В. Определение точек азеотропа по единому уравнению состояния // Теплофизические свойства веществ и материалов / ГСССД, 1988, вып. 24, с. 96 – 100.
 25. Троценко А. В. Термодинамическая эффективность простого детандерного цикла // Холодильная техника и технология. – 1989, вып. 48, с. 24 – 26.
 26. Троценко А. В. Термодинамические аспекты использования азеотропных смесей в дроссельных микрокриогенных системах // Холодильная техника и технология. – 1990, вып. 50, с. 57 – 60.
 27. Троценко А. В. Определение числа независимых переменных при термодинамическом расчете схем установок // Холодильная техника и технология. – 1991, вып. 52, с. 62 – 65.
 28. Троценко А. В. Сравнение моделей единых уравнения состояния при расчете простого дроссельного цикла // Холодильная техника и технология. – 1992, вып. 54, с. 65 – 69.
 29. Троценко А. В. Анализ критериев термодинамической эффективности простого дроссельного цикла // Холодильная техника и технология. – 1994, вып. 56, с. 53 – 57.
 30. Trotsenko A. V. Prediction and calculation of azeotropic behaviour from an equation of state // Fluid Phase Equilibria, 1997, v. 127, p. 123 – 127.

31. Троценко А. В. Обобщение соотношений Планка – Гиббса для уравнения состояния вещества // Журнал физической химии, 1998, т. 72, № 8, с. 1507 – 1509.
32. Троценко А. В. Термодинамические соотношения для критической точки чистого вещества // Журнал физической химии, 2001, т. 75, № 4, с. 586 – 589.
33. Троценко А. В. Раскрытие и анализ неопределенных форм в критической точке чистого вещества // Журнал физической химии, 2002, т. 76, № 5, с. 800 – 804.
34. Троценко А. В. Описание термодинамических свойств веществ уравнениями ван – дер – ваальсовского типа // Технические газы, 2002, №1, с.52 – 57.
35. Троценко А. В. Уравнение состояния технических газов // Технические газы, 2002, № 2, с.57 – 62.
36. Троценко А. В. Моделирование термодинамических свойств малоисследованных веществ // Технические газы, 2002, № 3, с.33 – 39.
37. Вассерман А. А., Бодюл С. В., Троценко А. В., Лавренченко Г. К. Программное обеспечение проектирования воздуходелительных установок // Технические газы, 2003, № 1, с.43 – 50.
38. Троценко А. В. Прогнозирование азеотропных превращений на основе кубических уравнений состояния // Технические газы, 2003, № 1, с.51 – 57.
39. Троценко А. В. Анализ работоспособности многопоточных теплообменных аппаратов // Технические газы, 2003, № 2, с. 9 – 15.
40. Троценко А. В., Валякина А. В. Определение критических параметров чистых веществ из единых уравнений состояния // Технические газы, 2005, № 4, с.50 – 55.
41. Троценко А. В., Валякина А. В. Формализация определения термодинамических свойств рабочих тел из единых уравнений состояния // Технические газы, 2006, № 4, с.55 – 58.
42. Рабочая смесь для дроссельной рефрижераторной системы: А. с. 666854 СССР, МКИ С 09 К 5/00 / Г.К. Лавренченко, В.С. Зиновьев, А.М. Сысоев, В.Н. Валякин, Н.И. Артеменко, А.В.Троценко (СССР). - № 2418657/23 – 26. Заявл. 09.11.76. Бюл. № 7. – 4 с.
43. Рабочая смесь для дроссельных рефрижераторных систем: А. с. 966107 СССР, МКИ С 09 К 5/00 / Г. К. Лавренченко, А. В.Троценко, В. Н. Анисимов А. В. Егоров, А. М. Сысоев, В. Н. Валякин, (СССР). - № 3273211/23 – 26. Заявл. 06.01.81. Оpubл. 15.10.82. Бюл. № 38. – 2 с.
44. Лавренченко Г.К., Троценко А.В., Рувицкий Г. Я., Табачник Э. И., Анисимов В. Н. Анализ и оптимизация энергетических характеристик дроссельных рефрижераторов на уровень охлаждения 150 К, работающих на расслаивающихся смесях // Деп. в УкрНИИ-ИНТИ 09.08.1983, №914 Ук – Д83.
45. Лавренченко Г. К., Троценко А. В. Анализ термодинамической эффективности цикла Линде на смесях веществ // Тезисы докладов совещания секции "Разработка методов сублимационного и криогенного консервирования пищевых продуктов и биологических материалов". Киев, 10 – 12 мая 1979 г.
46. Лавренченко Г. К., Троценко А. В., Табачник Э. И., Рувицкий Г. Я. Метод расчета критических параметров и фазовых равновесий бинарных смесей криоагентов // Тезисы докладов III-ей Всесоюзной научно – технической конференции "Криогенная техника - 82".
47. Додельцева Н.И., Рувицкий Г.Я., Табачник Э. И., Троценко А. В. Обобщенные алгоритмы расчета дроссельных циклов // Тезисы докладов Всесоюзной научно – технической конференции "Микрокриогенная техника - 84". М.: Цинтихимнефтемаш, 1984, с.33.
48. Троценко А. В. Определение числа независимых переменных при термодинамической оптимизации циклов криогенной техники // Тезисы докладов Всесоюзной научно – практической конференции "Интенсификация производства и применения искусственного холода". Л.: 1986, с. 94.
49. Троценко А. В. Анализ взаимосвязи между эксергетическими КПД системы и ее элементов // Материалы 60-й научно – технической конференции "Теория и практика вузовской науки", Одесса, ОГАХ, 1995, с. 50.

- смешивающимися компонентами // Холодильная техника и технология. – 1983, вып. 37, с. 38 – 44.
11. Лавренченко Г. К., Рувицкий Г. Я., Табачник Э. И., Троценко А. В. Определение параметра разнородного взаимодействия уравнения Редлиха – Квонга – Вильсона для смесей холодильных агентов // Холодильная техника и технология. – 1983, вып. 37, с. 44 – 47.
 12. Лавренченко Г. К., Табачник Э. И., Троценко А. В. Метод расчета фазового равновесия жидкость – пар чистых веществ // Теплофизические свойства веществ и материалов / ГСССД, 1983, вып. 18, с. 41 – 46.
 13. Додельцева Н.И., Лавренченко Г.К., Рувицкий Г.Я., Табачник Э. И., Троценко А. В. Расчет и анализ q , T – диаграммы двухпоточного теплообменника на многокомпонентных рабочих телах // Холодильная техника и технология. – 1984, вып. 39, с. 61 – 65.
 14. Табачник Э. И., Троценко А. В. Обобщенный алгоритм расчета кривой инверсии холодильных агентов // Холодильная техника и технология. – 1985, вып. 40, с. 58 – 62.
 15. Лавренченко Г.К., Анисимов В.Н., Додельцева Н.И., Рувицкий Г.Я., Табачник Э. И., Троценко А. В. Обобщенные алгоритмы расчета термодинамических свойств чистых фреонов и их смесей // Теплофизические свойства веществ и материалов / ГСССД, 1984, вып. 20, с. 33 – 55.
 16. Рувицкий Г. Я., Табачник Э. И., Троценко А. В. Метод вычисления плотности веществ по единому уравнению состояния при независимых переменных температуре и давлении // Теплофизические свойства веществ и материалов / ГСССД, 1985, вып. 22, с. 134 – 140.
 17. Троценко А. В., Табачник Э. И. Расчет q , T – диаграммы двухпоточного теплообменника // Холодильная техника и технология. – 1985, вып. 41, с. 33 – 36.
 18. Троценко А. В. Исследование влияния технических потерь на оптимальные параметры дроссельного рефрижераторного цикла // Холодильная техника и технология. – 1985, вып. 41, с. 89 – 92.
 19. Троценко А. В., Табачник Э. И. Метод анализа q , T – диаграммы двухпоточного теплообменника // Инженерно – физический журнал, 1986, т.1, № 1, с. 138 – 139.
 20. Троценко А. В., Табачник Э. И. Определение предельной термодинамической эффективности дроссельного рефрижераторного цикла // Холодильная техника и технология. – 1987, вып. 44, с. 65 – 69.
 21. Троценко А. В. Исследование теоретической холодопроизводительности простого детандерного цикла // Холодильная техника и технология. – 1987, вып. 45, с. 18 – 21.
 22. Троценко А. В. Анализ взаимного положения экстремумов критериев термодинамической эффективности циклов // Холодильная техника и технология. – 1988, вып. 46, с. 44 – 46.
 23. Троценко А. В., Табачник Э. И. Определение вида агрегатного состояния многокомпонентных систем // Холодильная техника и технология. – 1988, вып. 47, с. 23 – 26.
 24. Табачник Э. И., Таран В. Н., Троценко А. В. Определение точек азеотропа по единому уравнению состояния // Теплофизические свойства веществ и материалов / ГСССД, 1988, вып. 24, с. 96 – 100.
 25. Троценко А. В. Термодинамическая эффективность простого детандерного цикла // Холодильная техника и технология. – 1989, вып. 48, с. 24 – 26.
 26. Троценко А. В. Термодинамические аспекты использования азеотропных смесей в дроссельных микрокриогенных системах // Холодильная техника и технология. – 1990, вып. 50, с. 57 – 60.
 27. Троценко А. В. Определение числа независимых переменных при термодинамическом расчете схем установок // Холодильная техника и технология. – 1991, вып. 52, с. 62 – 65.
 28. Троценко А. В. Сравнение моделей единых уравнения состояния при расчете простого дроссельного цикла // Холодильная техника и технология. – 1992, вып. 54, с. 65 – 69.
 29. Троценко А. В. Анализ критериев термодинамической эффективности простого дроссельного цикла // Холодильная техника и технология. – 1994, вып. 56, с. 53 – 57.
 30. Trotsenko A. V. Prediction and calculation of azeotropic behaviour from an equation of state // Fluid Phase Equilibria, 1997, v. 127, p. 123 – 127.

31. Троценко А. В. Обобщение соотношений Планка – Гиббса для уравнения состояния вещества // Журнал физической химии, 1998, т. 72, № 8, с. 1507 – 1509.
32. Троценко А. В. Термодинамические соотношения для критической точки чистого вещества // Журнал физической химии, 2001, т. 75, № 4, с. 586 – 589.
33. Троценко А. В. Раскрытие и анализ неопределенных форм в критической точке чистого вещества // Журнал физической химии, 2002, т. 76, № 5, с. 800 – 804.
34. Троценко А. В. Описание термодинамических свойств веществ уравнениями ван – дер – ваальсовского типа // Технические газы, 2002, №1, с.52 – 57.
35. Троценко А. В. Уравнение состояния технических газов // Технические газы, 2002, № 2, с.57 – 62.
36. Троценко А. В. Моделирование термодинамических свойств малоисследованных веществ // Технические газы, 2002, № 3, с.33 – 39.
37. Вассерман А. А., Бодюл С. В., Троценко А. В., Лавренченко Г. К. Программное обеспечение проектирования воздуходелительных установок // Технические газы, 2003, № 1, с.43 – 50.
38. Троценко А. В. Прогнозирование азеотропных превращений на основе кубических уравнений состояния // Технические газы, 2003, № 1, с.51 – 57.
39. Троценко А. В. Анализ работоспособности многопоточных теплообменных аппаратов // Технические газы, 2003, № 2, с. 9 – 15.
40. Троценко А. В., Валякина А. В. Определение критических параметров чистых веществ из единых уравнений состояния // Технические газы, 2005, № 4, с.50 – 55.
41. Троценко А. В., Валякина А. В. Формализация определения термодинамических свойств рабочих тел из единых уравнений состояния // Технические газы, 2006, № 4, с.55 – 58.
42. Рабочая смесь для дроссельной рефрижераторной системы: А. с. 666854 СССР, МКИ С 09 К 5/00 / Г.К. Лавренченко, В.С. Зиновьев, А.М. Сысоев, В.Н. Валякин, Н.И. Артеменко, А.В.Троценко (СССР). - № 2418657/23 – 26. Заявл. 09.11.76. Бюл. № 7. – 4 с.
43. Рабочая смесь для дроссельных рефрижераторных систем: А. с. 966107 СССР, МКИ С 09 К 5/00 / Г. К. Лавренченко, А. В.Троценко, В. Н. Анисимов А. В. Егоров, А. М. Сысоев, В. Н. Валякин, (СССР). - № 3273211/23 – 26. Заявл. 06.01.81. Оpubл. 15.10.82. Бюл. № 38. – 2 с.
44. Лавренченко Г.К., Троценко А.В., Рувицкий Г. Я., Табачник Э. И., Анисимов В. Н. Анализ и оптимизация энергетических характеристик дроссельных рефрижераторов на уровень охлаждения 150 К, работающих на расслаивающихся смесях // Деп. в УкрНИИ-ИНТИ 09.08.1983, №914 Ук – Д83.
45. Лавренченко Г. К., Троценко А. В. Анализ термодинамической эффективности цикла Линде на смесях веществ // Тезисы докладов совещания секции "Разработка методов сублимационного и криогенного консервирования пищевых продуктов и биологических материалов". Киев, 10 – 12 мая 1979 г.
46. Лавренченко Г. К., Троценко А. В., Табачник Э. И., Рувицкий Г. Я. Метод расчета критических параметров и фазовых равновесий бинарных смесей криоагентов // Тезисы докладов III-ей Всесоюзной научно – технической конференции "Криогенная техника - 82".
47. Додельцева Н.И., Рувицкий Г.Я., Табачник Э. И., Троценко А. В. Обобщенные алгоритмы расчета дроссельных циклов // Тезисы докладов Всесоюзной научно – технической конференции "Микрокриогенная техника - 84". М.: Цинтихимнефтемаш, 1984, с.33.
48. Троценко А. В. Определение числа независимых переменных при термодинамической оптимизации циклов криогенной техники // Тезисы докладов Всесоюзной научно – практической конференции "Интенсификация производства и применения искусственного холода". Л.: 1986, с. 94.
49. Троценко А. В. Анализ взаимосвязи между эксергетическими КПД системы и ее элементов // Материалы 60-й научно – технической конференции "Теория и практика вузовской науки", Одесса, ОГАХ, 1995, с. 50.

50. Троценко А. В. Термодинамический анализ работоспособности многопоточных теплообменных аппаратов // Сборник трудов 2-й международной научно – технической конференции "Современные проблемы холодильной техники и технологии", Одесса, 2002. – С. 157 – 158.
51. Троценко А. В. Анализ составляющих эксергетических потерь теплообменных аппаратов // Сборник научных трудов 4-ой международной научно – технической конференции "Современные проблемы холодильной техники и технологии", Одесса, 2005, с. 129.
52. Троценко А. В., Валякина А. В. Унификация программного обеспечения для расчета термодинамических свойств рабочих тел // Збірник наукових праць Міжнародної науково – технічної конференції "Промисловий холод і аміак", Одеса, 2006, с. 107.

АНОТАЦІЯ

Троценко О.В. Дослідження термодинамічної ефективності низькотемпературних систем – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – Холодильна та криогенна техніка, системи кондиціювання. – Одеська державна академія холоду, - Одеса, 2006.

Дисертація присвячена розвитку термодинамічних основ дослідження та проектування низькотемпературних систем. Розглянуті питання, пов'язані з вибором критеріїв термодинамічної ефективності, які включають аналіз залежностей між оптимальними параметрами при різних цільових функціях, особливості застосування эксергетичних втрат в якості критерія, встановлення взаємозв'язку між эксергетичними КПД системи та її елементів. Запропонована формалізація термодинамічної моделі теплотехнічної системи. Отримане співвідношення для розрахунку числа незалежних змінних при термодинамічному розрахунку та оптимізації схем. Одержано узагальнення співвідношень Планка – Гіббса для критичної точки чистої речовини. Розкриті та проаналізовані невизначені форми в критичній точці чистої речовини, що дало змогу встановити нові набори критичних умов. Наведені розроблені алгоритми вирішення типових термодинамічних задач низькотемпературної техніки, таких як розрахунки парорідинної рівноваги та критичних параметрів чистих речовин, визначення виду агрегатного стану робочих тіл, знаходження параметрів кривої інверсії, встановлення працездатності теплообмінників. Проведено аналітичне дослідження дросельного та детандерного циклів при різних критеріях термодинамічної ефективності. Представлено запропонований метод розрахунку та прогнозування з єдиних рівнянь стану азеотропних перетворень в робочих тілах, що значно спрощує вирішення цих задач за рахунок умовної заміни суміші на псевдочисту речовину. Виконане прогнозування бінарних азеотропних сумішей для дросельних мікрокриогенних систем на азотний рівень охолодження.

Ключові слова: низькотемпературні системи, термодинамічний аналіз, оптимізація, алгоритм, робоче тіло, термодинамічні властивості.

АННОТАЦИЯ

Троценко А.В. Исследование термодинамической эффективности низкотемпературных систем – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.14 – Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования. – Одесская государственная академия холода, - Одесса, 2006.

Диссертация посвящена развитию термодинамических основ исследования и проектирования криогенных систем. Рассмотрены вопросы, связанные с выбором критериев термодинамической эффективности, которые включают анализ зависимостей между оптимальными параметрами при различных целевых функциях, особенности применения эксергетических потерь в качестве критерия, установление взаимосвязи между эксергетическими КПД системы и ее элементов. Предложена формализация термодинамической модели теплотехнической системы. Получено выражение для расчета числа независимых переменных при термодинамических расчетах и оптимизации схем. Получено обобщение соотношений Планка – Гиббса для критической точки чистых веществ. Раскрыты и проанализированы неопределенные формы в критической точке чистого вещества, что дало возможность установить новые наборы критических условий. Приведены созданные алгоритмы решения типовых термодинамических задач низкотемпературной техники, таких как расчет парожидкостного равновесия и критических параметров чистых веществ, определение агрегатного состояния рабочих тел, нахождение параметров кривой инверсии, установление работоспособности теплообменников. Проведено аналитическое исследование дросельного и детандерного циклов при различных критериях термодинамической эффективности. Представлен предложенный метод расчета и прогнозирования из единых уравнений состояния азеотропных превращений в смесях, который значительно упрощает решение этих задач за счет условной замены смеси на псевдочистое вещество. Выполнено прогнозирование бинарных азеотропных рабочих тел для дросельных микрокриогенных систем на азотный уровень охлаждения.

Ключевые слова: низкотемпературные системы, термодинамический анализ, оптимизация, алгоритм, рабочее тело, термодинамические свойства.

ABSTRACT

Trotsenko A.V. Investigation of thermodynamic efficiency of low temperature systems. – Manuscript.

Dissertation for the Doctor of Technical Science Degree by specialty 05.05.14 - Refrigeration and cryogenics engineering, conditioning systems. – Odessa State Academy of Refrigeration, - Odessa, 2006.

The dissertation is devoted to the development of thermodynamic fundamentals aimed for investigations and designing of low temperature systems. Some problems, connected with choice of thermodynamic efficiency criteria, are considered. They involve analysis of dependence between

optimal parameters determined at various criteria, usage exergetic losses as criterion, evaluation of system's exergetic efficiency relations with the efficiencies of its elements. The formalization for thermodynamic model of low temperature system is suggested. The general expression for determination of independent variable number in thermodynamic calculations and optimization was obtained. The generalization of Planck – Gibbs relations for the critical point of pure substances is obtained. The evaluation of some indefinite forms at the critical point of pure substances is carried out. This gives the possibility to discover new sets of critical conditions. Created general algorithms for solutions of typical thermodynamic tasks such as vapour – liquid equilibrium and critical parameters of pure substance, estimation of aggregate state of working substance, calculation of inversion curve parameters, determination of availability of heat exchangers are presented. The analytical investigations of throttle and expander cycles at various criteria are carried out. The method of prediction and calculation of azeotropic behaviour without performing mixture vapour – liquid equilibrium calculations is presented. The prediction results for binary azeotropic working substance of microcryogenic systems for nitrogen temperature level are shown.

Key words: low temperature systems, thermodynamic analysis, optimization, algorithm, working substance, thermodynamic properties.

