

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

На правах рукопису

НЕСТЕРЕНКО Станіслав Михайлович

ОПТИМІЗАЦІЯ МІКРОКРІОГЕННИХ КАСКАДНИХ ДРОСЕЛЬНИХ СИСТЕМ
ОХОЛОДЖЕННЯ НА РІВЕНЬ 80 К З БАГАТОКОМПОНЕНТНИМИ
РОБОЧИМИ ТІЛАМИ

Спеціальність 05.04.03 – Машини та апарати холодної та
і криогенної техніки та систем кондиціонування

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 1994



00756183 (U)

Робота виконана в Одеській державній академії холоду

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
Г.К.Лавренченко

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
В.І.Мілованов;
кандидат технічних наук, доцент
С.Ф.Горикін

Провідна організація - НДІ "Штогм", м. Одеса

Захист дисертації відбудеться " 30 " січня 1995 р.
о 11 годині на засіданні спеціалізованої ради К.068.27.01
при Одеській державній академії холоду за адресою:
270100, м.Одеса, вул. Петра Великого, 1/3, ОДАХ.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці академії.

Автореферат розіслано " 25 " грудня 1994 г.

Вчений секретар
спеціалізованої ради,
доктор технічних наук,
професор

Р.К.Нікульшин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток пристроїв оптичної електроніки, радіотехніки, а також приладів, використовуваних високотемпературні надпровідники, обумовлює необхідність постановки і вирішення задач, пов'язаних зі створенням і вдосконаленням ефективних та надійних мікрокріогених систем для криостатування на рівні 80 К.

Багатообразність та складність вимог, поставлених до мікрокріогених систем, роблять у ряді випадків компресорні дросельні системи охолодження (КДСО), працюючі на багатоконпонентних робочих тілах (БРТ), конкурентноспроможними у порівнянні з перевершувачами їх по ефективності газовими кріогеними машинами. Наявність у КДСО таких якостей, як простота і висока надійність, грають інколи вирішальну роль при широкому їх впровадженні. Тому дуже важливими являються дослідження, спрямовані на подальше підвищення їх ефективності. При цьому необхідно більш широко розглянути можливість використання різноманітних схемних рішень, а також вдосконалення окремих елементів КДСО.

Проведення досліджень по даній темі викликано недостатньою вивченістю питань вдосконалення циклів та схемних рішень КДСО для рівня 80 К, працюючих на БРТ.

Метою роботи було дослідження різноманітних термодинамічних циклів і схем каскадних КДСО для обґрунтованого вибору кращих схем і створення на їх основі ефективної каскадної КДСО на рівень 80 К.

Поставлена мета досягається рішенням слідуючих основних задач: розробка математичних моделей різноманітних циклів і схем КДСО; пошук найбільш ефективних схемних рішень каскадних КДСО; обґрунтування і вибір компонентів для формування БРТ каскадів КДСО на рівень 80 К; постановка і рішення задачі знаходження оптимальних параметрів циклу КДСО з одночасним розрахунком оптимальних складів БРТ каскадів; створення і дослідження макетного зразка каскадної КДСО на рівень 80 К, розробленого на базі вітчизняних змащуваних герметичних поршневих компресорів.

Наукова новизна. Вперше поставлена і вирішена задача визначення оптимальних складів БРТ і параметрів циклів каскадної КДСО на рівень криостатування 80 К; знайдено діапазони значень проміжної температури каскадної КДСО на рівень 80 К; запропонована методика розрахунково - графічного визначення оптимальної проміжної температури і одночасно з цим співвідношення об'ємних виробностей компресорів верхнього і нижнього каскадів КДСО на БРТ.

Основні наукові положення, які захищаються в роботі:

1. При створенні каскадної КДСО на БРТ на базі найбільш розповсюджених циклів з процесами дроселювання (Лінде, Клименко), вирішуючи питання вибору циклу для нижнього каскаду, необхідно віддавати перевагу циклу Лінде.

2. При розробці каскадної КДСО на БРТ з рівнем криостатування 80 К і корисною холодовиробністю до 10 Вт на базі параметричних рядів вітчизняних герметичних поршневих компресорів типу ХКВ і ВН енергетична ефективність може підвищуватись за рахунок вибору компресору для верхнього каскаду з мінімально можливою об'ємною виробністю.

Крім цього, автор захищає:

1. Дані про ефективні БРТ каскадів КДСО на рівень криостатування 80 К.

2. Методику розрахунково - графічного визначення оптимальної проміжної температури і співвідношення об'ємних виробностей компресорів каскадної КДСО на БРТ.

3. Результати досліджень енергетичних характеристик розробленої каскадної КДСО на БРТ на рівень криостатування 80 К.

Основні наукові результати:

1. Розрахункова ефективність каскадної установки на рівень криостатування 80 К на БРТ з застосуванням регенеративного дросельного циклу з однократним дроселюванням у нижньому каскаді на 25% вище ефективності КДСО з циклом Клименко у нижньому каскаді.

2. Перехід у верхньому каскаді на компресор з зменшеною в 2 рази об'ємною виробністю, дозволяє збільшити розрахункову ефективність каскадної КДСО на 35 - 45% при збереженні попередніх режимних параметрів.

3. При заданих режимних параметрах верхнього і нижнього каскадів каскадної КДСО, працюючої на БРТ, існує діапазон робочих проміжних температур, визначаючи так звану "температурну область стиковки" (ТОС) верхнього і нижнього каскадів.

Практична цінність роботи. На основі отриманих результатів можуть створюватись ефективні каскадні КДСО на БРТ для криостатування об'єктів в області температур 80 - 100 К. Розроблено експериментальний і макетний зразки каскадної КДСО для вказаних температур, володіючи покращеними енергетичними і масогабаритними характеристиками. Методика розрахунково-графічного визначення оптимальної проміжної температури може бути використана і при розробці каскадних КДСО на інші температурні рівні охолодження.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на Україні (ФТІНТ АН України, м.Харків) і в Росії (НПО "Протон", м.Москва).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 2 друковані роботи, отримано 3 авторських свідоцтва на винахід.

Апробація роботи. Основні результати досліджень по даній темі доповідались на науково - технічних конференціях ОГАХ.

Структура та об'єм дисертації. Роботу виконано на 158 сторінках машинописного тексту, в ній міститься 31 малюнок, 18 таблиць, вона складається з вступу, чотирьох глав, списку використаної літератури з 83 найменувань, додатків на 27 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

1. Вибір циклів для створення каскадних КДСО на рівень 80 К

Каскадна КДСО може створюватись на базі відомих дросельних циклів: регенеративного циклу Лінде; однопоточного циклу Клименко. При цьому можливі різноманітні сполучення вказаних циклів у схемі каскадної КДСО. Аналіз показав, що при розробці каскадної КДСО важливим є не тільки вибір і оптимізація характеристик циклів для нижнього каскаду (НК), наприклад Лінде і Клименко, але і оптимальне їх сполучення з економічними системами проміжного охолодження на базі дросельних циклів.

Задача оптимізації циклу Лінде при заданих T_0 і T_x ставиться таким чином:

$$\text{знайти } \dot{Z}_0^*, P_2^*, P_1^* = \text{opt} \{ \dot{Z}_0, P_2, P_1 \} + \max \eta_e, \quad (1)$$

де \dot{Z}_0^* - шуканий оптимальний циркулюючий склад; P_2, P_1 - тиски прямого та зворотнього потоків, відповідно.

В цілому рішення цієї задачі зводиться до пошуку оптимальних \dot{Z}_0^* для різних P_2 і P_1 з одночасною перевіркою реалізації теплообміну в рекуперативному теплообміннику (РТО) з точки зору II-ого початку термодинаміки та вибір найкращого складу з точки зору максимуму ексергетичного ККД.

Задача оптимізації циклу Клименко у загальному відді переслідує знаходження вже п'яти незалежних параметрів:

$$\text{знайти } \dot{Z}_0^*, P_2^*, P_1^*, G_1^*, T_c = \text{opt} \{ \dot{Z}_0, P_2, P_1, G_1, T_c \} + \max \eta_e, \quad (2)$$

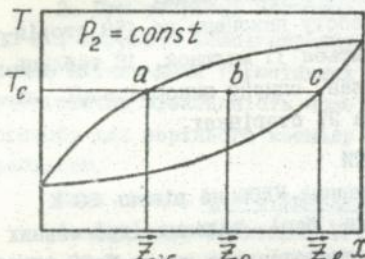
де G_1 - частка рідини, відділена у сепараторі; T_c - температура сепарації.

Ця задача вирішується з визначеними припущеннями: температура входу у сепаратор двуфазного потоку, температури виходу газу T_g і рідини T_r із сепаратору однакові і рівні T_c ; рідина G_1 , відділена у сепараторі, в реальних умовах може повністю виводитись із сепаратору шляхом регулювання верхнього дроселя.

Холодовиробність у циклі Клименко буде дорівнювати

$$Q_x = (1 - G_1) q_x, \quad (3)$$

тобто чим більше частка рідини відведена з сепаратору, тим менше величина Q_x . Крім того, частка рідини впливає на валовий склад БРТ Z_0 (мал.1), котрий циркулює у попередньому теплообміннику (у нижньому теплообміннику циркулює склад Z_u).



Мал.1. Позначення при вирішенні задачі газової рівноваги у циклі Клименко для бінарного БРТ: Z_0 - валовий склад; Z_u - склад парової фази; Z_l - склад рідиної фази; $G_1 = ab / ac$ - частка рідини

Для вирішення вказаних задач були розроблені відповідні алгоритми. Особливості чисельного розрахунку циклу Клименко є пошук оптимальних складів вибраного БРТ шляхом оптимізації простого дросельного циклу, реалізованого у нижньому теплообміннику, для різних температур входу в нього прямого потоку $T_{вх}$.

У відповідності з розробленими алгоритмами були проведені розрахунки вказаних циклів на базі БРТ (на основі системи $N_2 - CH_4 - C_2H_6$), вибраного згодом для каскадної установка

на рівень криостатування 80 К.

При розрахунку циклу Лінде на рівень криостатування 80 К та $T_0 = 300$ К для даного БРТ був отриман наступний оптимальний склад: $Z_{N_2} = 0,22 \frac{\text{моль}}{\text{моль}}$; $Z_{CH_4} = 0,13 \frac{\text{моль}}{\text{моль}}$; $Z_{C_2H_6} = 0,65 \frac{\text{моль}}{\text{моль}}$ при оптимальному тиску нагнітання $P_2 = 1$ МПа, і тиску зворотнього потоку $P_1 = 0,11$ МПа. Величина ексергетичного ККД з врахуванням характеристик реального компресору складала $\eta_e = 0,016$.

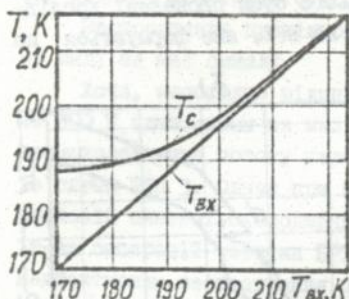
Для циклу Клименко оптимальні склади парової фази Z_u , спрямованої у нижній теплообмінник, і валового складу Z_0 вказаного БРТ зведені до таблиці 1 ($P_1 = 0,11 - 0,12$ МПа).

Таблиця 1.

N	$T_{вх}, K$	P_2, MPa	Склад оптимального БРТ, Z_u / Z_0 моль/ моль			$q_x, \frac{kJ}{m^3}$	η_e
			Z_{N_2}	Z_{CH_4}	$Z_{C_2H_6}$		
1	230	0,8	0,19/0,16	0,11/0,09	0,70/0,75	15,0	0,011
2	220	0,9	0,28/0,22	0,20/0,17	0,52/0,61	28,3	0,021
3	210	1,0	0,39/0,32	0,21/0,19	0,40/0,49	45,0	0,035
4	200	1,1	0,44/0,39	0,26/0,23	0,30/0,38	54,2	0,037
5	190	1,2	0,52/0,49	0,31/0,20	0,17/0,31	60,0	0,036
6	180	1,2	0,56/0,51	0,26/0,23	0,18/0,26	64,2	0,036

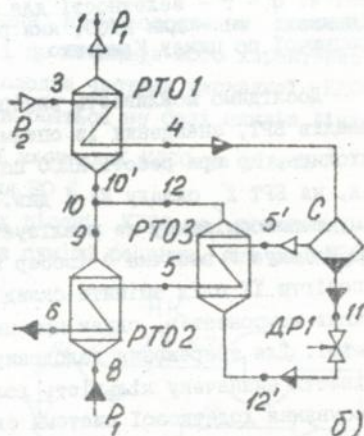
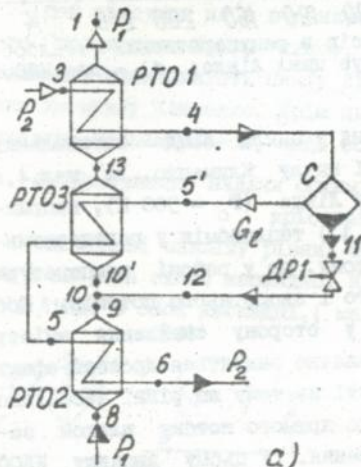
З'ясувалось, що чим вище температура $T_{вх}$ тим більше її різни-

ця від температури сепарації T_c (мал. 2). З цього малюнку видно, що при температурі $T_{вх} < 200$ К в схему установки з сепарацією фаз слід виключати додатковий теплообмінник, який дозволяє підохлодити паровий потік, що виходить з сепаратору, перед тим, як спрямувати його у нижній теплообмінник.



Мал.2. Залежність температури сепарації T_c від температури входу $T_{вх}$ в РТО 2

Варіанти схем циклу з сепарацією і з додатковим теплообмінником РТО 3 показані на мал.3(а,б). У цьому випадку при розрахунку циклу слід враховувати і балансові співвідношення для даного теплообмінника і те, що $T_c = T_4 = T_{11} = T_5$, і $T_{вх} = T_5$.

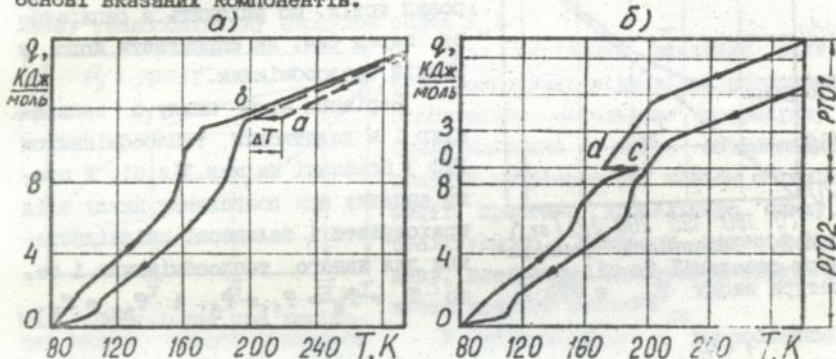


Мал. 3. Схеми КДСО, які реалізують цикл Кліменко з підохлодженням парової фази G_1 (РТО 1, РТО 2, РТО 3 - відповідно, попередній, нижній і додатковий теплообмінники)

Порівняльний аналіз отриманих результатів показав, що ефективність циклу Кліменко для БРТ, яке зформовано на основі одних і тих же компонентів, в 1,3 - 2,2 рази вище ефективності циклу Лінде (однак у реальній системі цей вигравш може бути іншим і не таким значним із-за втрат у сепараторі). Ці дані узгоджуються з результатами, отриманими Бічовим А.А. при дослідженні різних схем на основі циклу Кліменко з використанням змащуваного герметичного ком-

пресору.

Тому актуальною є задача визначення ефективності цих циклів і у складі каскадної КДСО (тобто з урахуванням можливості підводу додаткового холоду у цих циклах). Для цього були проведені дослідження $q - T$ - залежностей різних циклів на БРТ, яке формується на основі вказаних компонентів.



Мал. 4. $q - T$ - залежності для процесів в рекуперативних теплообмінниках: а) - для КДСО, яка реалізує цикл Лінде; б) - для КДСО, працюючої по циклу Клименко

Дослідимо можливість використання у циклі Лінде оптимальних складів БРТ, знайдених із оптимізації циклу Клименко. Із мал.4,а виходить, що при роботі КДСО по циклу Лінде ($T_0 = 300 \text{ K}$), наприклад, на БРТ Z_u складу N4 (див. табл.1) теплообмін у регенеративному теплообміннику не реалізується тому, що у районі температури 200 K існує "засічка" ізобар прямого і зворотнього потоків. Щоб запобігти їй слід змінити склад БРТ у сторону зменшення вмісту важких компонентів, однак при цьому значно знизиться дросель-ефект суміші. Для збереження холодовиробності на тому ж рівні необхідно підвести визначену кількість холоду до прямого потоку шляхом застосування додаткової системи охолодження. У цьому випадку КДСО становиться каскадною. Процес а - б на мал. 4а - це результат проміжного охолодження прямого потоку у конденсаторі-випарнику (КВ). Реалізацію теплообміну слід при цьому розглядати окремо для теплообмінника до КВ (штрихова лінія на мал. 4,а) і після.

На мал.4,б зображено $q - T$ - діаграму для КДСО, яка реалізує цикл Клименко з температурою сепарації вище 200 K. Відмітною особливістю даної $q - T$ - залежності є те, що верхній і нижній теплообмінники розділені вузлом сепарації - змішування, і процеси, які проходять у ньому, роблячи вплив на ізобару зворотнього потоку

(процес с - d), забезпечують виконання теплообміну в РТО 1 і РТО 2 без підводу додаткового холоду до прямого потоку.

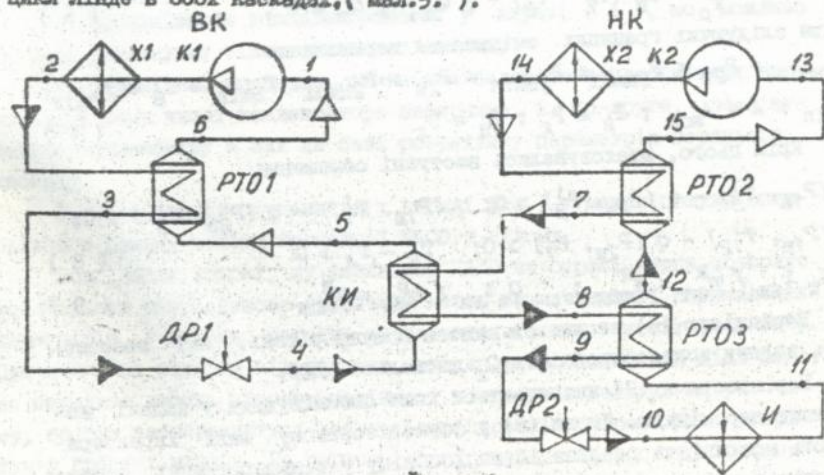
Застосування проміжного охолодження для циклу Клименко у цьому виді не має смислу.

Хоча, необхідно відзначити, що при температурі сепарації нижче 200 К (див.схеми на мал. 4) можливо у циклі Клименко здійснити проохолодження потоку пара із сепаратору, виключаючи таким чином із схеми РТО 3. Однак при цьому витрати для отримання холоду у додатковій системі охолодження і зменшення корисної холодовиробності із-за сепарації частини БРТ, у порівнянні з циклом Лінде, роблять неефективним застосування проміжного охолодження в циклі Клименко. В такому випадку розрахункова ефективність каскадної установки на рівень 80 К з циклом Лінде в НК на 25% вище ефективності КДСО з циклом Клименко у тому ж каскаді.

Цей підсумок не є очевидним і складає основу першого наукового положення. Таким чином, введення проохолодження дозволяє підвищити ефективність циклу Лінде, і це наближує його характеристики до циклу Клименко. Крім цього холодна частина каскадної КДСО виходить більш простою, якщо вона створюється на базі циклів Лінде.

2. Постановка задачі оптимізації каскадної КДСО на рівень криостатування 80 К

На основі аналізу різних схемних рішень КДСО на рівень 80 - 100 К вибрана схема каскадної КДСО на суміші речовин, яка реалізує цикл Лінде в обох каскадах, (мал.5.).



Мал. 5. Схема каскадної КДСО на БРТ

Як цільова функція при оптимізації каскадної КДСО була вибрана величина ексергетичного ККД:

$$\eta_{\text{ек}}^{\text{К}} = \left| 1 - T_0 / T_x \right| \eta_{\text{ел}}^{\text{В}} (P_{2\text{В}} / P_{1\text{В}}) \eta_{\text{ел}}^{\text{Н}} (P_{2\text{Н}} / P_{1\text{Н}}) =$$

$$= \left\{ G_{\text{В}} \left[\epsilon_5 (Z_{\text{В}}, P_{1\text{В}}, T_5) - \epsilon_4 (Z_{\text{В}}, P_{2\text{В}}, T_4) - \sum Q_{\text{В}}^{\text{В}} \right] + \right.$$

$$+ G_{\text{Н}} \left[\epsilon_{13} (Z_{\text{Н}}, P_{1\text{В}}, T_0) - \epsilon_{14} (Z_{\text{Н}}, P_{2\text{Н}}, T_0) - \sum Q_{\text{В}}^{\text{Н}} \right. \\ \left. - \sum Q_{\text{В}}^{\text{Н}} \right] \left. \right\} / (G_{\text{В}} \epsilon_{\text{зв}} \eta_{\text{ел}}^{\text{В}} + G_{\text{Н}} \epsilon_{\text{зн}} \eta_{\text{ел}}^{\text{Н}}), \quad (4)$$

де $\sum Q_{\text{В}}^{\text{В}}$, $\sum Q_{\text{В}}^{\text{Н}}$, $\sum Q_{\text{В}}^{\text{Н}}$ - суми втрат холодовиробності, від надорекуперації і теплопритоків, відповідно, в верхньому каскаді і в нижньому каскаді при $T > T_{\text{пр}}$ і $T < T_{\text{пр}}$.

Незалежними параметрами є тиски $P_{1\text{В}}$, $P_{2\text{В}}$ потоків верхнього каскаду і тиски $P_{1\text{Н}}$, $P_{2\text{Н}}$ потоків нижнього каскаду, співвідношення розходів $A = Vh_{\text{В}} / Vh_{\text{Н}}$, де $Vh_{\text{В}}$, $Vh_{\text{Н}}$ - відповідно, об'єми, описані поршнями компресорів верхнього і нижнього каскадів, температура проміжного охолодження $T_{\text{пр}} = T_8$ і оклади циркулюючих БРТ $Z_{\text{В}}$, $Z_{\text{Н}}$ - відповідно, в верхньому і нижньому каскадах.

Задача режимної оптимізації параметрів каскадного циклу з одночасним визначенням оптимальних складів БРТ (без врахування впливу тисків зворотніх потоків) була поставлена у наступному виді: знайти

$$\begin{aligned} Z_{\text{В}}^*, Z_{\text{Н}}^*, P_{2\text{В}}^*, P_{2\text{Н}}^*, A, T_{\text{пр}}^* = \text{opt} \{ Z_{\text{В}}, Z_{\text{Н}}, P_{2\text{В}}, P_{2\text{Н}}, A, T_{\text{пр}} \} + \\ + \text{max} \eta_{\text{ек}}^{\text{К}}. \end{aligned} \quad (5)$$

з урахуванням виконання нерівності

$$G_{\text{Н}} \Delta t_{\text{О}}^{\text{Н}} + G_{\text{Н}} (\epsilon_7 - \epsilon_8) - \sum Q_{\text{В}} - \sum Q_{\text{Х}} \geq \delta, \quad (6)$$

і при наступних границях змінювання перемінних:

$$P_{2\text{В} \text{min}} \leq P_{2\text{В}} \leq P_{2\text{В} \text{max}}; P_{2\text{Н} \text{min}} \leq P_{2\text{Н}} \leq P_{2\text{Н} \text{max}}; T_{8 \text{min}} \leq T_8 \leq T_{8 \text{max}}; \\ A_{\text{min}} \leq A \leq A_{\text{max}}; Z_{\text{В}} \in D_z; Z_{\text{Н}} \in D_z \quad (7)$$

Крім цього, враховувались наступні обмеження:

$$q(P_{1\text{В}}, T_5^1) - q(P_{2\text{В}}, T_3^1) > 0; q(P_{1\text{Н}}, T_{11}^1) - q(P_{2\text{В}}, T_3^1) > 0; \\ q(P_{1\text{Н}}, T_{12}^1) - q(P_{2\text{Н}}, T_7^1) > 0; T_8^1 - T_4^1 > 0 \quad (8)$$

$$G_{\text{Н}} \epsilon_{\text{зн}} / \eta_{\text{ел}}^{\text{Н}} \leq \eta_{\text{мак}}^{\text{Н}}; G_{\text{В}} \epsilon_{\text{зв}} / \eta_{\text{ел}}^{\text{В}} \leq \eta_{\text{мак}}^{\text{В}} \quad (9)$$

Нерівність (6) вводить вимогу пошуку рішень, які забезпечують задану холодовиробність $Q_{\text{Х}}$ каскадної КДСО.

Нерівностями (7) визначається поле оптимізуємих у задачі незалежних перемінних. Умови (8) у формалізованому виді характеризують можливість реалізації теплообміну у рекуперативних теплообмінниках системи охолодження, причому T_8^1 і T_4^1 - поточні значен-

ня температур у t - тому перерізу конденсатора - випарника.

Поставлена задача (5) є многопараметричною задачею високого рівня складності. Для її вирішення були внесені обґрунтовані обмеження до перемінних і прийнят ряд спрощувачих припущень.

Математична модель каскадної КДСО розроблялась з введенням слідуючих припущень: склади БРТ обох каскадів, варіюючі у всьому діапазоні концентрацій, не впливають на об'єми і енергетичні характеристики компресорів; при верифікації розхідних характеристик компресорів як визначаючі параметри вибиралось об'єм, описуєий поршнем компресору (V_h), і степінь підвищення тиску $\kappa = P_2 / P_1$; величина втрат із-за теплопритоків до холодної частини каскадної КДСО приймалась як частина холодовиробності верхнього і нижнього каскадів $Q_{т.п.} = \alpha_1 Q_B + \alpha_2 Q_H$; не враховувались втрати холодовиробності каскадної КДСО із-за гідравлічних опірв у апаратах.

У розробленій математичній моделі враховувалось, що в конденсаторі-випарнику через конденсаторну частину циркулював потік БРТ-НК, визначаєий розходом компресору НК, а через випарникову частину - потік БРТ-БК, визначаєий розходом через компресор БК.

Енергетичний баланс конденсатора-випарника має вид:

$$G_B t_5 (Z_B, P_{1B}, T_5) - G_B t_4 (Z_B, P_{1B}, T_4) = \\ = G_H t_7 (Z_H, P_{2H}, T_7) - G_H t_8 (Z_H, P_{2H}, T_8). \quad (10)$$

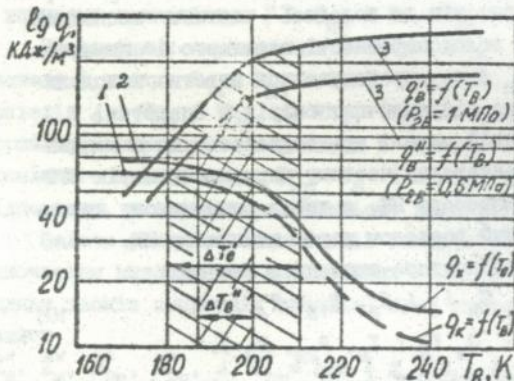
Оптимізація каскадної дросельної системи у відповідності з поставленою задачею і з врахуванням розроблених математичних моделей була розбита на три основні етапи:

1. Максимізація холодовиробності у виразі (4), що можливо на базі розрахунку тільки нижнього каскаду.
2. Перевірка, по-перше, виконання балансів теплообмінних апаратів, у тому числі конденсатора-випарника, і, по-друге, реалізуємість теплообміну в них на базі розрахунку параметрів верхнього каскаду.
3. Мінімізація знаменника у виразі (4) з метою пошуку оптимального режиму роботи каскадної КДСО у цілому.

Розв'язання розрахунку каскадної КДСО на окремі етапи дозволяє реалізувати розрахунково-графічний метод визначення її оптимальних параметрів (подібно методу, застосовуємого для чистих речовин). При цьому на відміну від відомих методик, розроблених для цієї цілі, ця методика досить проста, надійна і потребує невеликих витрат часу, бо тут застосовуються добре відпрацьовані програми для розрахунку простих циклів. На першому етапі визначається склад оптима-

льного робочого тіла БРТ-НК на основі розрахунку нижнього каскаду, проведеного при умові, що у конденсаторі-випарнику до прямого потоку НК може бути підведена будь-яка необхідна кількість холоду q_K (по суті даний розрахунок заснован на ебстрагуванні від верхнього каскаду). Пошук оптимального БРТ-НК здійснюється для різних проміжних температур T_B , у результаті чого визначаються залежності $q_K = f(T_B)$ і $q_X = f(T_B)$ (відповідно, криві 1 і 2 на мал.6), причому кожна точка залежностей (мал.6) відповідає умові:

$$\dot{Z}_{H\text{opt}} = \dot{Z}_H(q_X \text{ max}, P_{2H}) \mid T_B = \text{const}, P_{1H} = \text{const} \quad (11)$$



Мал.6. Енергетичні характеристики каскадної КДСО.

Залежність $q_K = f(T_B)$ визначає граничні значення питомої холодовиробності КДСО; залежність $q_X = f(T_B)$ характеризує максимальну питому кількість холоду, яку може прийняти потік нижнього каскаду.

На другому етапі проводиться пошук оптимальних БРТ-НК і визначається питома холодовиробність верхнього каскаду при різних температурах $T_A = T_B - \Delta T_{ср}$. У підсумку отримуємо залежність $q_B = f(T_B)$, у кожній точці якої виконується умова:

$$\dot{Z}_B \text{opt} = \dot{Z}_B(\eta_e \text{ max}) \mid T_B = \text{const}, P_{2B} = \text{const}, P_{1B} = \text{const} \quad (12)$$

Ця залежність в графічному виді приведена на мал.6 (криві 3).

Одночасно з пошуком оптимального БРТ-НК здійснюється перевірка виконання енергетичного балансу і реалізація теплосміну у конденсаторі-випарнику при даних умовах. Таким чином, визначається діапазон робочих проміжних температур ΔT_B , які лежать у так званій температурній області стиковки (ТОС) верхнього і нижнього каскадів (на відміну від чистих речовин, де перетин характеристик навантаження верхнього каскаду і конденсатора - випарника дає одну робочу температуру). Слід відзначити, що на цьому етапі розрахунок проводиться при значенні $\lambda = 1$.

Третій етап розрахунків спрямован на мінімізацію знаменника у

виразі (4), а саме на пошук мінімуму суми W_H и W_B . Величина W_H залежить в основному від відношення тисків P_{2H} / P_{1H} і незначно від складів БРТ-НК. Тому вона практично визначається вже на першому етапі розрахунків, і, так як вказані тиски фіксовані, то W_H не вносить суттєвої корективки у кінцеве значення ексергетичного ККД. Пошук мінімального W_B має сенс у випадку, коли $q_B > q_K$, тобто при наявності запасу холодовиробності верхнього каскаду.

Для криостатування об'єктів на рівні 80 К для нижнього каскаду було вибрано БРТ-НК на базі $N_2 - CH_4 - C_2H_6$ (склади БРТ-НК відповідають Z_0 із табл.1). Питоме навантаження на конденсатор - випарник q_K при цьому не перевищує 60 кДж/м³. У верхньому каскаді як робоче тіло може застосовуватись БРТ на базі $R14 - R23 - nC_4H_{10}$, питомо холодовиробність q_B якого в температурній області стиковки у 3 - 5 разів перевищує значення q_K .

Перехід до меншого значення W_B можливо здійснити двома шляхами. Перший - це зменшення розрахункового тиску нагнітання P_{2B} , що приводить до зниження роботи адиабатного стискування $l_{зв}$ у виразі (4). Другий - зменшення розходу компресору БК G_B . При цьому, запас холодовиробності, який має верхній каскад, дає можливість зменшити значення q_B .

Як показали розрахунки, при зниженні тиску нагнітання зсувається і ТОС (див. мал. 6), внаслідок чого значно скорочується діапазон можливих робочих проміжних температур, що приводить до погіршення функціональних можливостей КДСО. А змінювання розходу через компресор БК практично не впливає на ТОС. Пояснюється це тим, що у першому випадку при переміні тиску змінюються і оптимальні склади БРТ-БК, які, в свою чергу, суттєво впливають на тепловий баланс і реалізацію теплообміну у конденсаторі-випарнику. У другому випадку оптимальні склади БРТ-БК залишаються колишніми, і, поки є запас холодовиробності, можливо зниження розходу майже без зміни ТОС.

Тому при розрахунках і оптимізації КДСО на БРТ істотну увагу слід приділяти відношенню розходів компресорів - А. На мал. 6 приведені значення питомих холодовиробностей, де відношення розходів прийнято рівним одиниці. Уявлення про зміну розрахункової потужності W_B від величини А в діапазоні робочих температур T_B при різних тисках можна отримати із табл.2. Розхід компресору НК прийнятним відповідним розходним характеристикам компресору КМВ-8.

Аналіз табл.2 показує, що двократне зниження тиску нагнітання компресору верхнього каскаду зменшує W_B на 14-15%, а при переході

Таблиця 2

N	Тиск $P_{2в}$, МПа ($P_{1в} = 0,1$ МПа)	Потужність компресору, Вт		
		$A = 1$	$A = 0,75$	$A = 0,5$
1	1,2	185	139	93
2	1,0	179	134	90
3	0,8	171	128	86
4	0,6	162	122	81

до компресору з зменшеною у 2 рази об'ємною виробністю потужність також знижується у 2 рази, що дозволяє підвищити ефективність каскадної КДСО на 35 - 45% при збереженні попередніх режимних параметрів. З врахуванням незначного скорочування ТОС, слід віддавати перевагу другому варіанту мінімізації потужності.

3. Результати експериментальних досліджень каскадної КДСО на БРТ

Для підтвердження оптимізаційних розрахунків були проведені експериментальні дослідження каскадної КДСО, яка реалізує цикл Лінде в обох каскадах. Експериментальне вивчення енергетичних характеристик каскадної КДСО проводилось у два етапи. На першому етапі була створена установка, яка містила в собі розроблену холодну частину і компресорно-конденсаторний агрегат, включаючи у себе два герметичних змащуваних компресора ХКВ-8 для ВК і НК. На другому етапі визначались енергетичні характеристики каскадної КДСО, компресорно-конденсаторний агрегат якої включав у себе герметичний компресор ХКВ-8 для ВК і ВН-400 для НК. При проведенні досліджень на першому етапі були експериментально визначені оптимальні склади азот - вуглеводного БРТ - НК (див. табл.3).

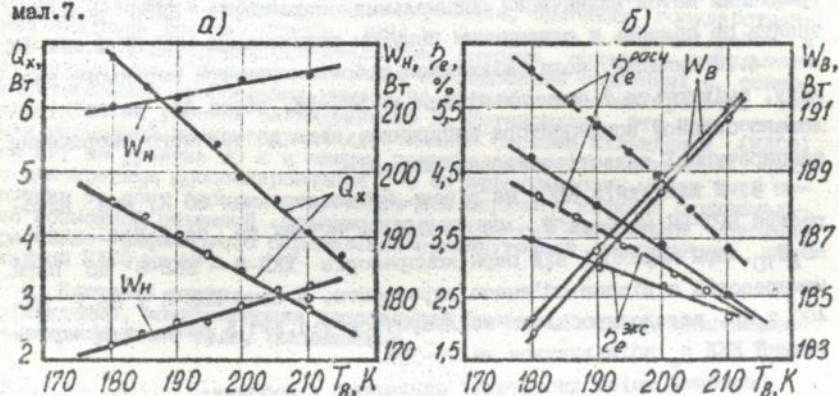
Таблиця 3

$T_{пр}, K$	у середньому		
	Z_{N2}	Z_{CH4}	Z_{C2H6}
180	0,27	0,30	0,43
190	0,25	0,31	0,44
200	0,23	0,32	0,45
210	0,21	0,33	0,46

оптимальні склади були отримані при наступних умовах роботи нижнього каскаду: тиск зворотнього потоку $P_{1в} = 0,08 - 0,1$ МПа; тиск прямого потоку $P_{2в} = 0,7 - 0,8$ МПа; температура криостатування $T_x = 80 - 82$ К. Відміна

експериментальних даних від розрахункових валових складів (див. табл. 1, склади Z_v) пов'язана з тим, що відбувається загігання частини висококипячих компонентів БРТ у реальній установці. Оптимальні склади БРТ - ВК для робочого діапазону проміжних температур склали $Z_{R14} = 0,1 - 0,15$ моль/моль; $Z_{R23} = 0,4 - 0,45$ моль/моль; $Z_{nC4H10} = 0,4 - 0,5$ моль/моль. Відношення розходів на першому етапі при застосуванні двох компресорів ХКВ-8 дорівнювало $A = 1$.

На другому етапі застосування пари компресорів ХКВ - 8 у верхньому каскаді і ВН-400 у нижньому каскаді дозволило отримати відношення об'ємних розходів $\Lambda = 0,5$. Результати порівняльних випробувань систем (ХКВ-8 - ХКВ-8) і (ХКВ-8 - ВН-400) приведені на мал.7.



Мал. 7. Експериментальні характеристики каскадних КДСО з різними співвідношеннями об'ємних характеристик компресорів

○ - система (ХКВ-8 - ХКВ-8), $\Lambda = 1$; ● - система (ХКВ-8 - ВН-400), $\Lambda = 0,5$.

Експериментально встановлено, що при зниженні співвідношення розходів у два рази холодовиробність установки Q_x у робочому діапазоні проміжних температур змінюється в 1,4-1,5 рази (мал. 7,а). Перехід на компресор ВН - 400 у нижньому каскаді рівноцінно зниження W_B верхнього каскаду, у результаті чого ефективність установки збільшується на 25-35% (по розрахункам на 35-45%, як слідує із мал. 7,б). Це вказує у цілому на хорошу збіжність експериментальних і розрахункових досліджень.

Висновки

1. Цикл Клименко, який має більшу ефективність у порівнянні з циклом Лінде, втрачає свої переваги при застосуванні його у нижньому каскаді каскадної КДСО. Про це свідчать порівняльні розрахункові дослідження, які показують, що процеси, які відбуваються у вузлі сепарації - змішування, забезпечують виконання теплообміну у регенеративних теплообмінниках без підводу додаткового холоду до прямого потоку.

2. При наявності великого запасу холодовиробності верхнього каскаду ($q_B > q_H$) для підвищення ефективності каскадної КДСО вигідно переходити до більш низьких значень об'ємної виробності ком-

пресорів БК, ніж змінювати тиски нагнітання компресорів з більшими значеннями об'ємної виробності.

3. Для каскадної КДСО на БРТ, на відміну від каскадних установок на чистих речовинах, існує діапазон робочих проміжних температур або температурна область стиковки. Розроблений розрахунково-графічний метод визначення оптимальних параметрів КДСО дозволяє знайти цю область з одночасним пошуком оптимальних МРТ-НК і МРТ-БК.

4. У випадку, коли змінюються робочі параметри верхнього каскаду, змінюються і оптимальні оклади БРТ-БК, через що, зміна теплового балансу конденсатора-випарника, веде до значного скорочення температурної області стиковки каскадів.

5. У каскадній КДСО на рівень криостатування 80 К, яка використовує БРТ-НК на основі $N_2 - CH_4 - C_2H_6$ і БРТ-БК на базі $R14 - R23 - nC_4H_{10}$, при переході від пари компресорів ХКВ-8 - ХКВ-8 до пари компресорів з різною об'ємною виробністю, а саме ХКВ-8 у БК і ВК-400 у НК, холодовиробність збільшується у 1,4-1,5 рази, а ексергетичний ККД η_e збільшується на 25-35%.

Основний зміст дисертації викладено у роботах:

1. Исследования энергетических характеристик гелиевого рефрижератора с энергокриогенной ступенью/ Г.К.Лавренченко, С.В.Котенко, С.М.Нестеренко, А.Л.Клебанер//Холодильная техника и технология:Респ.межвед.науч.-техн.об.-1990.-Вып.50.-С.53-57.

2. Результаты сравнительных испытаний микрокриогенных систем на смесях с использованием различных схемных решений/ Г.К.Лавренченко, С.А.Зубрилин, С.М.Нестеренко, Ю.В.Змитроченко// Холодильная техника и технология:Респ.межвед.науч.-техн.об.-1992.-Вып.55.-С.52-57.

3. А.с.№1511546(СССР). Дроссельная криогенная установка/Г.К.Лавренченко, С.М.Нестеренко, Ю.В.Змитроченко и др.-Опубл. в БИ.-1989, №36.

4. А.с.№1536949(СССР). Микроохладитель/ Г.К.Лавренченко, С.А.Зубрилин, Ю.В.Змитроченко, С.М.Нестеренко.- Опубл. в БИ.-1989, №41.

5. А.с.№1637303(СССР). Рабочее тело компрессионной дроссельной системы охлаждения/Г.К.Лавренченко, Р.С.Михальченко, В.Т.Архипов, Ю.В.Змитроченко, С.М.Нестеренко и др.- Опубл. в БИ.-1990, №42.

Умовні позначення

T - температура; P - тиск; i - ентальпія; Z - склад БРТ; η_e - екоексергетичний ККД; l - питома робота стиснення; A - коефіцієнт співвідношення розходів; G - розхід БРТ; W - потужність; η_{el} - електричний ККД компресору; T_0 - температура навколишнього середовища. δ - задаване перевищення розрахункової холодовиробності.

Аннотация

НЕСТЕРЕНКО С.М. Оптимизация микрокриогенных каскадных систем охлаждения на уровень 80 К с многокомпонентными рабочими телами. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.03 - Машины и аппараты холодильной и криогенной техники и систем кондиционирования, Одесская государственная академия холода, Одесса, 1994 г. Защищено 5 научных работ в том числе 3 авторских свидетельства, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований связанных с совершенствованием дроссельных циклов на многокомпонентных рабочих телах (МРТ) на уровень охлаждения 80 К. Установлено, что при создании каскадной компрессорной дроссельной системы охлаждения (КДСО) на МРТ на уровень 80 К в нижнем каскаде следует использовать цикл с однократным дроселированием, а ее эффективность может быть повышена за счет выбора компрессора для верхнего каскада с минимально возможной объемной производительностью. Разработана методика расчетно-графического определения промежуточной температуры каскадной КДСО на МРТ.

Ключевые слова:

охлаждение, компрессорная дроссельная система, каскад, многокомпонентное рабочее тело, оптимизация.

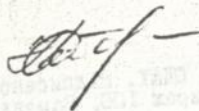
NESTERENKO S.M. Optimization of Microcryogenic Cascade Refrigerating Systems at Temperature Level of 80 K Using Multicomponent Working Agents.

Thesis for a scientific degree of Candidate of Science (Engineering) on the speciality: 05.04.03 - Machines and apparatus of refrigerating and cryogenic engineering and air-conditioning systems. Odessa State Academy of Refrigeration, Odessa, 1994.

Five scientific papers, (including three author certificates) containing the results of theoretical and experimental researches dealing with the improvement of throttling cycles with multicomponent working agents intended for refrigeration at the temperature level 80 K are presented for discussion. It has been found out that on creating a cascade compressor throttle systems for refrigeration at the temperature level of 80 K using multicomponent working agents it is preferable in its lower cascade to use a cycle with one-time throttling. The system's choosing a proper compressor for the upper cascade with the minimum possible volumetric capacity. The techniques of the calculation-graphical determination of an intermediate temperature of the cascade compressor throttle refrigerating system using multicomponent working agents are developed.

Key words:

refrigeration, compressor throttle system, cascade, multicomponent working agent, optimization.



ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

AB 31.683