

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА

На правах рукопису

Горпинко Юрій Іванович

ПІДВИЩЕННЯ ХОЛОДОПРОДУКТИВНОСТІ
ДРОСЕЛЬНИХ РЕФРИЖЕРАТОРІВ ОПТИМІЗАЦІЄЮ
ПАРАМЕТРІВ І ВТРАТ РЕГЕНЕРАТИВНОГО
ТЕПЛООБМІННИКА

05.14.05 - "Теоретична теплотехніка"

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук.



Харків - 1997



00752458 (V)

Дисертація є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теплохолодопостачання Харківської державної академії міського господарства (ХДАМГ).

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Микола Олександрович Шульга.

Науковий консультант: доктор технічних наук Володимир
Федорович Гетманець.

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук, професор
Яків Абрамович Левін;
кандидат технічних наук, доцент
Ілля Іванович Петухов.

Провідна установа - Харківський державний політехнічний
університет, м. Харків.

Захист відбудеться "30" травня 1997 р.

об 14 год. в ауд. № 2021.к. на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д. 02.27.04 при Харківському авіаційному інституті,
за адресою: 310070, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

З текстом дисертації можна ознайомитися у бібліотеці
Харківського авіаційного інституту.

Автореферат розісланий "18" квітня 1997 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., ст. н. с.

Незим В.Ю.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ: T - температура; P - тиск, ΔT - недорекуперація; Q - теплопритоки; λ - коефіцієнт теплопровідності; $Ntu = k S_{обр} / \dot{W}_x$ - число одиниць перенесення тепла між потоками; W - тепловий еквівалент потоку робочого тіла; \dot{m} - витрата; h - ентальпія; c_p - питома теплоємність; i - неефективність теплообмінника (ТО); ϵ - ефективність ТО; F - площа поперечного перерізу; S - площа поверхні теплопередачі; ρ - густина; α - коефіцієнт тепловіддачі; k - коефіцієнт теплопередачі; β - коефіцієнт термічного розширення; x - координата вздовж осі теплообмінника; $\lambda^* = \lambda F / (W_x \Delta T_x)$ - приведений коефіцієнт теплопровідності; ΔT_z - максимальна різниця температур в ТО; $T_{хн}$ - температура холодного джерела.

Індекси: t - теплий потік; x - холодний потік ТО; Σ - сумарна величина; $ос.$ - відповідає температурі навколишнього середовища; $н$ - зовнішнє середовище; $б$ - боковий; $кр$ - крайовий; $пер$ - перегородка; $ст$ - оболонка; $\bar{\quad}$ - індекс приведення.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ. Сучасним актуальним технічним завданням є розробка систем термостабілізації об'єктів інфрачервоної техніки, оптичної електроніки, медичного приладобудування на рівні азотних та гелієвих температур (65-85K, ~4K). До систем охолодження оптичної електроніки космічних апаратів ставляться жорсткі вимоги щодо габаритно-вагових характеристик. Для медичних систем важливо забезпечити автономність і незначну тривалість часу підготовки системи до роботи. Описаним вище вимогам у багатьох випадках задовольняють дросельні системи охолодження (ДСО), що відрізняються від інших типів установок простотою сполучення з об'єктами охолодження, мож-

ливістю мініатюризації. На досконалість дросельної системи помітно впливають енергетичні втрати у регенеративному теплообміннику (РТО). Отже, будь-який, навіть незначний, фактор може призвести до відчутної зміни ефективності теплообмінного апарата, а через нього і всієї дросельної системи.

З літератури відомо, що створити теплообмінник високої ефективності вдається не завжди, навіть у ситуаціях, коли не є критичними ціна апарата або його гідравлічні характеристики. З іншого боку, в деяких ситуаціях можна в рази скоротити поверхню теплопередачі РТО без відчутних енергетичних втрат дросельної системи. Ці факти свідчать про те, що: а) неналежним чином вирішено проблему розрахунку РТО дросельних систем; б) підвищення ефективності РТО можливе не тільки за рахунок нарощування поверхні теплопередачі. Класичні аналітичні дослідження вказують на наявність глибокого екстремуму ефективності теплообмінника в ситуаціях зменшення співвідношення теплових еквівалентів потоків при незмінному значенні числа N_{tu} . Прогноз вказаних розв'язків у застосуванні до РТО обіцяє дати відчутний вигреш, причому одразу в багатьох напрямках покращення системи, а саме, скорочення габаритів та металоємності (і відповідно ціни) теплообмінного апарата та енергетичних витрат на самозахолодження системи, зменшення гідравлічного опору, важливе для деяких систем на основі суміші газів (сумішних).

Таким чином, створення конкурентноздатних дросельних рефрижераторів, у тому числі для космічних апаратів, стримується відсутністю загального підходу до оптимізації РТО в умовах можливості варіювання співвідношенням теплових еквівалентів його потоків і, відповідно, відсутністю розроблених критеріїв оптимізації та необґрунтованістю вибору досяжного мінімального значення технічних втрат у РТО.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ. Мета роботи полягає у вивченні можливості підвищення холодопродуктивності кріогенних дросельних систем шляхом вибору тієї області нерівності теплових еквівалентів потоків РТО, що забезпечить мінімальне значення технічних втрат у ньому; а також у визначенні обмежень, пов'язаних з вторинними ефектами, на підвищення холодопродуктивності ДСО за рахунок збільшення числа N_{tu} вказаного апарата.

При цьому основними завданнями роботи були:

- дослідити можливі варіанти вияву режиму екстремальної ефективності РТО в конкретних дросельних системах;
- вивчити особливості, що накладають нелінійності реальних процесів у РТО на досяжність і глибину передбачуваного екстремуму ефективності теплообмінника;
- дослідити ситуації, в яких втрати від обмеженості числа N_{tu} в РТО стають порівняними із впливом вторинних ефектів;
- дослідити вплив конструктивних оболонки та теплопритоку по опорах на ефективність кріогенних ТО;
- розробити адекватну комп'ютерну модель, що забезпечить розрахунок РТО при сильній нелінійності властивостей робочих тіл, з урахуванням вторинних ефектів, для ТО з конструктивними оболонками, в тому числі в ситуаціях теплоізолюваних кінців.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ. При проведенні досліджень використано комплексний підхід. Зіставлено висновки аналітичних розв'язань, результати досліджень комп'ютерних моделей та натурних випробовувань. У процесі виконання роботи використано методи теорії диференціальних рівнянь, теорії збурень, метод контрольного об'єму при одержанні дискретного аналога комп'ютерної моделі, числові методи розв'язування систем дифе-

ренційних рівнянь, метод структурного програмування, ексергетичний метод.

НАУКОВА НОВИНА роботи полягає в одержанні таких важливих результатів:

- визначено, що в сучасних дросельних рефрижераторах регенеративний теплообмінник є джерелом суттєвих втрат холодопродуктивності; ці втрати можна значно зменшити, використовуючи надмірність теплового еквівалента одного з потоків робочого тіла;
- для регенеративних ТО дросельних рефрижераторів, на відміну від класичного підходу Кейса і Лондона, необхідно виділяти дві області, одній з яких відповідає переважання теплового еквівалента гріючого потоку, другій - потоку, що нагрівається;
- запропоновано допоміжний критерій, що дозволяє для конкретної дросельної системи визначити ту з областей, де нерівність теплових еквівалентів потоків забезпечить мінімальну величину втрат у регенеративному теплообміннику;
- показана недоцільність нарощування поверхні теплопередачі регенеративного ТО для підвищення холодопродуктивності дросельного рефрижератора в ситуаціях, коли зовнішній теплоприток до вказаного апарата і осьові перетоки тепла по елементах його конструкції вже домінують у структурі втрат РТО;
- виявлено, що досконалість кріогенних ТО (особливо для мікрохолодників) неприпустимо оцінювати за величиною теплої недорекуперації, оскільки теплопритоки з навколишнього середовища призводять до її зменшення;
- запропоновано для характеристики ефективності регенеративного теплообмінника дросельної системи порівнювати досягнуте і теоретично мінімальне значення ентальпії потоку високого тиску на виході з цього апарата;

- показано, що вплив осьової теплопровідності конструктивних оболонок теплообмінника на його недорекуперації в області значень $\lambda^* < 0.02$ еквівалентний дії перегородки між потоками тієї ж теплопровідності;

- розроблено оригінальний алгоритм і методику числового перевірного розрахунку протитокових ТО, що гарантують успішне завершення ітераційного процесу практично незалежно від вибору початкових розподілів температур і придатні для розрахунку теплообмінника у складі криогенної системи.

ТЕОРЕТИЧНА І ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ. Проведені дослідження теоретично обґрунтовують можливість створення ефективної ДСО на рівні криогенних температур з теплообмінником, значення числа N_{tu} якого суттєво нижче, ніж у сучасних РТО. Для спрощення аналізу конкретного способу поліпшення дросельної системи запропоновано новий критерій ефективності РТО. Розроблено надійне програмне забезпечення перевірного розрахунку теплообмінника.

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ. Основні результати роботи використані у ФТІНТ НАН України при розробці й виготовленні криогенних систем космічного і наземного призначення, а також у Криогенній лабораторії Академії наук Китаю.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ. Основні положення і результати роботи доповідалися на двох міжнародних конференціях "Cryogenics" (Кошице, 1990 р., Москва - 1991 р.), а також на науково-технічних конференціях ХДАМГ у 1995-1996 рр.

ПУБЛІКАЦІЇ. За темою дисертації опубліковано 6 друкованих робіт. Внесок автора в публікації, написані у співавторстві, полягає в тому, що ним розроблено комп'ютерні й комбіновані моделі вискоефективних ТО та різних дросельних систем охолодження, проведено експерименти на вказаних моде-

лях. Автор також приймав безпосередню участь в інтерпретації та узагальненні результатів досліджень.

СТРУКТУРА Й ОБСЯГ РОБОТИ. Дисертація складається з 127 сторінок друкованого тексту, 27 рисунків, 1 таблиці та має вступ, чотири розділи, висновки, список використаної літератури з 104 найменувань і додатки.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розглядається актуальність, наукова новизна та практична цінність проведених досліджень. Визначено мету дисертаційної роботи та основні завдання, які необхідно вирішити для досягнення даної мети.

У першому розділі обгрунтовано нетрадиційну постановку задачі дослідження дросельної системи, що концентрує увагу на РТО. Цій постановці найбільш точно відповідають ситуації, коли зафіксовано тиск засобу видачі стиснутого холодагента, тиск за дроселем, температури теплового і холодного джерела, склад та витрата робочого тіла. Завданням є вивчення можливості досягнення максимальної холодопродуктивності системи, припускаючи, що забезпечено ефективне підведення тепла до низькотемпературного джерела.

У такій загальній постановці виділено дві важливих, але мало вивчених підзадачі: 1) співвідношення теплових еквівалентів потоків РТО не змінюється, збільшення поверхні теплопередачі не супроводиться критичним для системи зростанням гідравлічних втрат; 2) співвідношення теплових еквівалентів може змінюватися. У роботах [1,3] обгрунтовано визначення вказаного співвідношення (\bar{W}) як відношення теплового еквівалента потоку високого тиску до теплового еквівалента потоку низького тиску.

Така можливість забезпечена в теплообміннику останнього рівня гелієвого дросельного рефрижератора з неоновим попереднім охолодженням, у випадку вибору схеми з дроселюванням гелію в каналах прямого потоку, а також для РТО сумішних систем. Дисертанту була доступна для аналізу достатньо повна інформація про експерименти на сумішних компресорних дросельних системах охолодження (КДСО) з незмінним заправним складом суміші при зміні режиму їх роботи. У процесі відхилення \bar{W} при зміні режиму роботи ДСО може змінюватись теоретично досяжний дросель-ефект робочого тіла системи і витрата суміші, що ускладнює аналіз.

У другому розділі розглянуто методологію вивчення характеристик РТО і дросельних систем. При дослідженні дросельних систем у комп'ютерних моделях ДСО використано дані натурних випробувань, проведених працівниками ФТІНТу. Наявність інформації про витрату робочого тіла та вихідних характеристик компресорного блока і випарника у сталому режимі роботи ДСО дає змогу звести розрахунок характеристик кріоблока до перевірного розрахунку РТО. У деяких ситуаціях ті ж спрощення моделі можливі через конструктивні особливості ДСО.

Використання описаного підходу до вивчення дросельних рефрижераторів пов'язано, головним чином, з відсутністю загальновизнаних точних комп'ютерних моделей РТО. У зв'язку з цією проблемою результати вивчення комп'ютерної моделі, не підтверджені даними натурних випробувань можуть викликати недовіру. Наявність даних випробувань також дозволяє мати інформацію про реакцію системи на зміну параметрів РТО, що підвищує вірогідність досліджень.

У даному розділі описана одновимірна математична модель протитокового рекуперативного теплообмінника, опублікована в

роботах [1,4]. На її базі створено програмне забезпечення, що дозволяє: здійснювати проектний або перевірний розрахунок (для останнього забезпечена балансова точність не гірше 0,03%); врахувати нелінійність теплофізичних властивостей холодоагентів, а також змінність коефіцієнтів гідравлічного опору й тепловіддачі; проектувати теплообмінники з розподіленим дроселюванням стиснутого потоку; враховувати осьову теплопровідність конструкції (у тому числі з нелінійним характером залежності коефіцієнту теплопровідності від температури), теплоприток по опорах ТО та теплоприток до його бокової поверхні; використовувати стандартні програми розрахунку властивостей робочого тіла.

Система теплообмінник - навколишнє середовище описується такими рівняннями в диференційній формі. Потоки:

$$m_i c_{pi}(T_i, P_i) \frac{dT_i}{dx} + \rho_i^{-1}(T_i, P_i) [1 - \beta_i(T_i, P_i)] \frac{dP_i}{dx} = \\ = \alpha_i(T_i, P_i) \left[\frac{S_{n,i}}{L} (T_n - T_i) + \frac{S_{ст,i}}{L} (T_{ст,i} - T_i) \right]; \quad i=x, r. \quad (1)$$

Оболонки:

$$F_{ст} \frac{d}{dx} [-\lambda_i(T_{ст,i})] = -[\alpha_i(T_i, P_i)(T_{ст,i} - T_i) - q_n(T_{ст,i})] \frac{S_{ст,i}}{L} \quad (2)$$

Перегородка:

$$\alpha_x(T_x, P_x)(T_n - T_x)S_x = \alpha_r(T_r, P_r)(T_r - T_n)S_r. \quad (3)$$

З граничними умовами:

$$T_x(L) \approx T_{xu} = \text{const}; \quad T_r(0) \approx T_{oc} = \text{const};$$

$$\frac{dT_{ст}(0)}{dx} = \eta[T_{ст}(0)]; \quad \frac{dT_{ст}(L)}{dx} = \phi[T_{ст}(L)]. \quad (4)$$

Рівняння енергії для елемента конструкції, який розділяє потоки холодоагента записані з припущенням, що його тепловий опір в поздовжньому напрямку нескінченно великий, опором в поперечному напрямку можна знехтувати. Гідравлічні опори потоків були розраховані за лінійними втратами тиску. Відмінністю (і позитивною якістю) моделі є використання граничних умов другого роду в рівнянні теплопровідності оболонки.

Якщо не враховувати вторинні ефекти, приведену систему диференціальних рівнянь (д. р.) можна проінтегрувати аналітично; отриманий загальний інтеграл визначає постійність ентальпійного натиску по довжині теплообмінного апарата. Остання умова може слугувати базою для так званих інтервальних методів розрахунку ТО. У дисертації наведено методику проектного розрахунку інтервальним методом, що використовує незалежно розроблене програмне забезпечення за властивостями робочих тіл ДСО.

При перевірному розрахунку береться до уваги максимально можливе число факторів впливу, тому для інтегрування системи д. р. був використаний метод кінцевих різниць. При розв'язанні системи алгебраїчних рівнянь реалізовано оригінальний алгоритм. Ідея останнього базується на тому, що для інтегрування крайової задачі достатньо задатися будь-яким рівним розподілом температур по перегородці і оболонках. Визначивши температурні профілі потоків холодоагента, легко перерахувати профіль температур перегородки. Знаючи розподіл температури холодного потоку, інтегруємо рівняння теплопровідності оболонки. Відновлюємо температури потоків і т. д. Стійкість розв'язання забезпечена використанням фізичних обмежень на поведінку розв'язків крайової задачі під час ітераційного процесу.

Адекватність комп'ютерної моделі регенеративного ТО перевірена у порівнянні з розрахунком за інтервальним методом та зіставленням з аналітичним розв'язком Крігера, що враховує осьові перетоки тепла. В обох випадках спостерігалось накладання результатів. Підтверджує адекватність запропонованого способу моделювання РТО і сумішевих КДСО також порівняння даних розрахунків автора з результатами натурних випробовувань різних ДСО, виконаних у ФТІНТі та Кріогенній лабораторії Академії наук Китаю. На рис. 1 наведено порівняння результатів дослідження різними способами характеристик сумішевої КДСО в експерименті, коли змінюється температура навколишнього середовища при незмінному тискові нагнітання компресора 4.0 МПа.

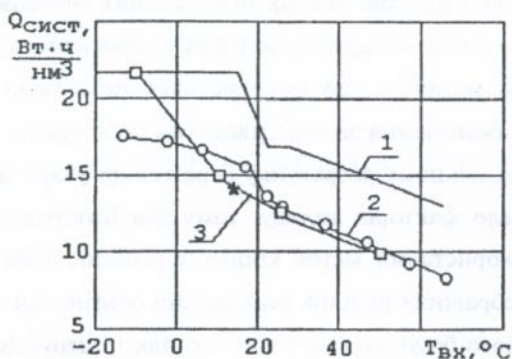


Рис.1. Холодопродуктивність КДСО при зміні температури суміші на вході в РТО.

1 - теоретично максимальна; 2 (—○—) - комп'ютерний експеримент; 3 (—□—) - дослідні дані, * - точка роси; тиск нагнітання компресора - 4.0 МПа; $Ntu=7.8 \div 10.3$.

Зіставлено результати вивчення комп'ютерної моделі автора, даних натурних випробовувань ФТІНТу і теоретично максимальної холодопродуктивності системи. У дисертації ті ж залежності було

порівняно для аналогічних експериментів з тиском нагнітання компресора 3.0-і 4.0 МПа. Якісна відмінність результатів у зоні температур нижче точки роси спостерігалася для всіх трьох експериментів і має пояснення в зміні хімічного складу суміші [2].

У третьому розділі проведено аналіз експериментів, здійснених на комп'ютерних моделях, в яких змінювалась питома холодопродуктивність двох сумішевих та гелієвої ДСО різними фізичними способами. Результати досліджень комп'ютерних моделей сумішевих систем підтверджені даними натурних випробувань. Аналіз свідчить, що в кожному експерименті досягнуто підвищення холодопродуктивності системи за рахунок зменшення втрат в РТО, яке було забезпечене надлишком теплового еквівалента одного з потоків робочого тіла.

На рис. 2 зображено залежності кінцевих недорекуперацій РТО сумішевої КДСО, що відповідають експерименту зі зниженням температури суміші на вході в кріоблок. Пунктирними лініями зображено залежності, розраховані за аналітичним розв'язанням роботи [3] (останні переходять у класичні у випадку визначення \bar{w} у формі $\bar{w} = w_{T,x} / w_{max}$). Розв'язки роботи [3] мають вигляд

$$\Delta T_T = \frac{\bar{w} - 1}{c \bar{w} - 1} \Delta T_\Sigma ; \quad (5)$$

$$\Delta T_x = \frac{c (\bar{w} - 1)}{c \bar{w} - 1} \Delta T_\Sigma , \quad (6)$$

де $c = \exp(Ntu (\bar{w} - 1) / \bar{w})$.

Аналітичні криві побудовано на базі інформації про \bar{w} і Ntu , отриманої в комп'ютерних експериментах. Суттєве зменшення холодної недорекуперації в зоні $\bar{w} < 1$, де теоретично максималь-

на холодопродуктивність системи не змінюється, прогнозоване аналітичним розв'язком спостерігається і для експериментальних даних. Показано, що перевищення у декілька разів величини теоретичної недорекуперації порівняно з експериментальною для всіх комп'ютерних експериментів пояснюється відхиленням середньоінтегрального температурного натиску від значення середньологарифмічного для кінцевих недорекуперацій.

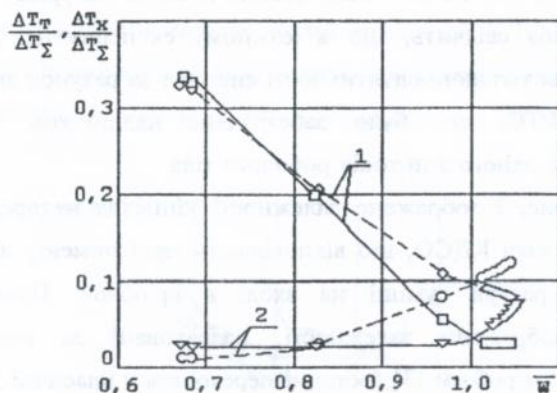


Рис. 2. Залежності відносних недорекуперацій на “теплому” й “холодному” кінцях РТО від приведеного теплового еквіваленту при зміні температури навколишнього середовища.

— - Дані комп'ютерних експериментів; ---- - аналітичні розв'язки (5),(6); 1 - тепла недорекуперація; 2 - холодна недорекуперація, $P_{\text{наг}} = 4.0$ МПа. $Ntu=7.1 \div 9.6$. $T_{\text{вх}} = 260 \div 340$ К.

Була досліджена також ДСО, що зріджує аргон. Її відмінністю [4] є попереднє охолодження потоку аргону в кільцевій щілині між горловиною кріостату та зовнішньою оболонкою РТО сумішевої КДСО, за рахунок використання холоду зворотнього потоку суміші. Далі аргон конденсується на випарнику КДСО і стікає в нагромаджувач, що знаходиться всередині

кріостату під випарником. Натурні випробування вказаної системи показали, що її холодопродуктивність в режимі зрідження теплого аргону з передохолодженням на РТО на $\sim 25\%$ вище, ніж у тієї ж системи при зрідненні аргону, з температурою, близькою до температури насичення, виключно на випарнику. В останньому режимі КДСО компенсує тепловиділення електронагрівника з регульованою потужністю, що знаходиться у глибині рідкого аргону. Дослідження відповідної комп'ютерної моделі показало, що збільшення холодопродуктивності системи забезпечене зниженням технічних втрат у РТО; припустимо розглядати вплив потоку аргону як додаток до теплового еквіваленту потоку високого тиску. Експерименти на комп'ютерній моделі дали результати, адекватні даним випробувань. Зниження технічних втрат досягнуто за рахунок роботи РТО в режимі відхилення \bar{W} від 1, причому таке відхилення відбувається в області $\bar{W} > 1$.

Досліджена також баллонно-редукторна гелієва ДСО з передохолодженням твердим неонем, в якій для досягнення температури кріостатування 4.4 К передбачалося дроселювати гелій у каналах стиснутого потоку РТО. Такий варіант робить актуальною задачу вибору оптимального тиску на виході прямого потоку з РТО. На рис. 3 наведено результати перевірного розрахунку РТО при зміні гідравлічного опору каналів прямого потоку. Останнє є одним із способів зміни співвідношення теплових еквівалентів теплообмінника. Геометричні розміри апарата були оптимізовані на вихідний тиск 2,0 МПа за допомогою програми проектного розрахунку. Моделювання зміни гідравлічного опору було досягнуто варіюванням коефіцієнта гідравлічного опору. Відхилення аналітичного розв'язання і комп'ютерних експериментів корелює з співвідношенням середньоінтегрального та середньологарифмічного для кінцевих недорекуперацій температурного на-

тисків. З рис. 3 видно, що РТО у даному експерименті має оптимум по теплій недорекуперації. У роботі [6] показано, що варіювання гідравлічним опором прямого потоку РТО не спричинює додаткових втрат ексергії у дросельному блоці.

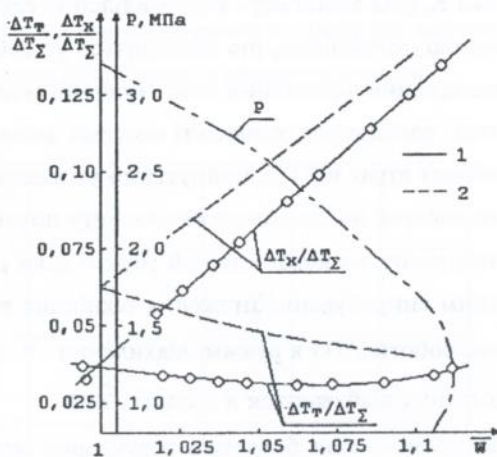


Рис. 3. Вплив тиску P на виході потоку теплого гелію з РТО на \bar{W} та відносні недорекуперації апарата.

1 - комп'ютерний розрахунок; 2 - співвідношення (5),(6);

$$Ntu = 12 \div 15; \bar{Q}_{\Sigma\delta} = 0; Q_{\Sigma\kappa p} = 0.$$

Аналіз лінійної моделі ДСО свідчить, що енергетичний критерій ефективності теплообмінного апарата (в літературі його заведено називати температурним ККД), найбільш часто уживаний для оцінки термодинамічної ефективності РТО, не завжди корелює з якістю апарата як елемента дросельної системи. Використовуючи рис. 2, можна легко уявити якісний характер розв'язків (5), (6) для широкого спектру \bar{W} , розширивши праву частину

графіка до значень $\bar{W} \sim 1,5$ і враховуючи, що аналітичний розв'язок в області $\bar{W} > 1$ майже симметричний відносно прямої $\bar{W}=1$. Для сумішної КДСО, варіювання параметром \bar{W} РТО якої не зв'язане із зміною дросель-ефекта при температурі холодного джерела, в області $\bar{W} < 1$ найбільшому значенню температурного ККД РТО відповідає теоретично максимальна холодопродуктивність системи, а в області $\bar{W} > 1$ - близьке до нуля.

Температурний ККД розроблений у літературі як характеристика конструктивної досконалості ТО і записаний у формі, що ігнорує втрати від небалансу теплових еквівалентів, внаслідок того, що вони принципово не можуть бути компенсовані конструктивними методами. Критерій ефективності РТО дросельної системи в розглянутій ситуації мусить враховувати балансові втрати в області $\bar{W} > 1$ і не враховувати їх в області $\bar{W} < 1$.

У випадку гелієвої системи зміна \bar{W} досягається варіюванням середньоінтегральної теплоємності потоку високого тиску при незмінному значенні ізотермічного дросель-ефекта на теплому кінці РТО, тому балансові втрати зменшуватимуть холодопродуктивність системи в області $\bar{W} < 1$, але не будуть виявлятися в зоні $\bar{W} > 1$. У роботі [2] автором запропоновано оцінювати ефективність РТО дросельних рефрижераторів, порівнюючи досягнуте й теоретично мінімальне значення ентальпії потоку високого тиску на виході з цього апарата. Запропонована в роботі [2] найбільш проста форма запису критерію має вигляд

$$\varepsilon_{\text{РТО}} = (h_{\text{досягнуте}} / h_{\text{(min)}}) 100\%, \quad (7)$$

де h - ентальпія потоку високого тиску на виході з РТО.

Указаний критерій дає змогу коректно враховувати втрати, пов'язані з нерівністю теплових еквівалентів у будь-якій ситуації; критерій захищений від спотворення зовнішнім теплопритоком.

У четвертому розділі розглянуто вплив вторинних факторів на неефективність і недорекуперації протитокових теплообмінників. Для аналізу використано аналітичне розв'язання роботи [4], отримане на основі узагальнення проведених автором комп'ютерних експериментів. У дисертації використано частковий випадок розв'язку [4], що враховує особливості конструкції і умови роботи РТО дросельних мікрокріогенних рефрижераторів. Вказане рішення зіставляється з даними експериментів на комп'ютерних моделях високоефективних протитокових ТО.

Досліджено вплив конструктивних оболонки порівняно з розв'язками Крігера (розв'язок роботи [4] в окремому випадку переходить в розв'язок Крігера) для осьових перетоків тепла по теплопередавальній перегородці між потоками. Показано, що вплив осьових перетоків тепла по оболонках для значень $\lambda^* < 0.02$ еквівалентний до дії перегородки. З аналізу ефективності оребрення пластинчато-ребристих ТО, проведеного в роботі [3], випливає, що для даної конструкції особливо суттєва суперечність між вимогою достатньо високої теплопровідності конструкційного матеріалу для забезпечення ефективної роботи оребрення та загальною для кріогенних ТО вимогою мінімальних осьових перетоків тепла.

Досліджувався також вплив зовнішнього теплопритоку на недорекуперації протитокового теплообмінника, в тому числі теплопритоків по опорах. Показано, що холодна недорекуперація збільшується пропорційно зовнішньому теплопритоку, а тепла - зменшується. У дисертації вивчено ситуації як збалансованих ТО, так і небалансу теплових еквівалентів потоків. У всіх випадках зіставлення даних комп'ютерних експериментів з відповідним аналітичним розв'язком виявило задовільну кількісну відповідність і якісну узгодженість, також і при нелінійному роз-

поділі теплопритоку до бокової поверхні (за випромінюванням) і нелінійності теплопровідності конструкційного матеріалу. На рис. 4 наведено порівняння результатів комп'ютерних експериментів і аналітичного розв'язання для випадку $\bar{w}=1.11$ в ситуації рівномірно розподіленого зовнішнього теплопритоку до бокової поверхні теплообмінника. Квадратиками на рис. 4 позначено дані вивчення комп'ютерної моделі РТО описаного вище зріджувача аргону.

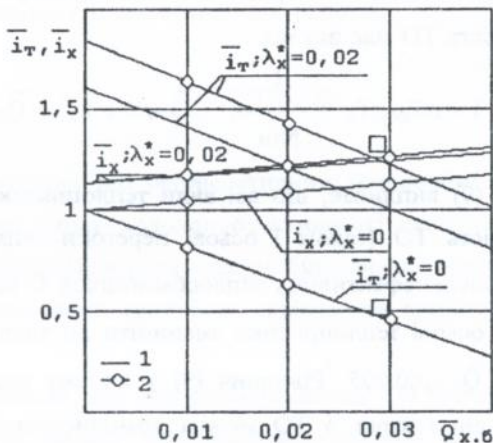


Рис. 4. Залежності приведених недорекупераций незбалансованого теплообмінника \bar{i}_T та \bar{i}_x від теплопритоку $\bar{Q}_{x,6}$ до бокової поверхні оболонки, що взаємодіє з холодним потоком при $\lambda_x^* = \text{const}$.

1 - комп'ютерний експеримент; 2 - розв'язок роботи [3];
 □ - дані для РТО зріджувача аргону; $Ntu=17.5$; $\bar{w} = 1.11$; $\bar{Q}_{\Sigma, \text{кр}}=0$;

Теплове навантаження від аргону можна інтерпретувати як рівномірно розподілений теплоприток до бокової поверхні теплообмінника. Таким чином теоретичний результат про дію зовнішнього теплопритоку на недорекуператії ТО підтверджується

даними випробувань. Приведена неефективність \bar{i} є співвідношенням недорекуперацій

$$\bar{i}_{T,x} = \frac{\Delta T_{T,x}}{\Delta T_{T,x}(\lambda^*=0, Q_{\Sigma,кр}=0; Q_{\Sigma,с}=0)} \quad (8)$$

Проаналізуємо структуру втрат збалансованого протитокового ТО на основі аналітичного розв'язку роботи [4], висновки якого багаторазово перевірені дисертантом шляхом зіставлення з даними комп'ютерних експериментів. Для випадку $Ntu \gg 1$ і $\bar{W}=1$ неефективність ТО має вигляд

$$i_{TO} = 1 - \Delta T_x / \Delta T_{\Sigma} = \frac{1}{Ntu} + \bar{Q}_{\Sigma,с}/2 + \lambda_{\Sigma}^* + \bar{Q}_{\Sigma,кр} \quad (9)$$

З рівняння (9) випливає, що всі види теплопритоків збільшують неефективність ТО (також і осьові перетоки тепла). Тому для створення високоефективних теплообмінників ($i \leq 0.02$) треба всі зовнішні й осьові теплопритоки зменшити до значень $\lambda_{\Sigma}^* < 0.005$; $\bar{Q}_{\Sigma,с} < 0.01$; $\bar{Q}_{\Sigma,кр} < 0.005$. Рівняння (9) у явному вигляді показує, що не всі види втрат в ТО можна компенсувати збільшенням числа Ntu апарата. Не має сенсу збільшувати Ntu до рівня більшого, ніж $10 / (\bar{Q}_{\Sigma,с}/2 + \lambda_{\Sigma}^* + \bar{Q}_{\Sigma,кр})$, оскільки в цьому випадку значення i_{TO} визначатиметься величиною теплопритоків до ТО.

Аналізуючи структуру втрат в РТО можна зробити такий висновок: рекомендований у літературі спосіб знешкодження впливу вторинних факторів теплообміну шляхом збільшення числа Ntu апарата має обмежену область використання і дає ефект тільки в тому випадку, коли резерв підвищення ефективності ТО, пов'язаний з недостатньою величиною параметра Ntu , не є малим у порівнянні з величиною втрат від вторинних факторів теплообміну. Якщо ж цей резерв малий, то покращення

конструкції необхідно здійснювати в напрямку безпосереднього зниження теплопритоків різної природи. Але це складне технічне завдання, для розв'язання якого потрібне використання чи створення нових конструкційних та ізоляційних матеріалів, або розробка принципово нових конструкцій ТО. Для існуючих технологій наведений в четвертому розділі аналіз дозволяє з більшою достовірністю оцінити значення технічних втрат у РТО, яке і накладає обмеження на граничні характеристики реальної ДСО.

У додатках наведено документи, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ.

1. Показано, що регенеративний теплообмінник є джерелом суттєвих втрат холодопродуктивності сучасних дросельних рефрижераторів. Ці втрати можуть бути значно зменшені використанням надмірності теплового еквівалента одного з потоків робочого тіла.

2. Виявлено, що для регенеративних ТО дросельних рефрижераторів, на відміну від класичного підходу Кейса і Лондона, необхідно виділяти дві області, одній з яких відповідає превалювання теплового еквівалента гріючого потоку, другій - потоку, що нагрівається; запропоновано допоміжний критерій, що дозволяє для конкретної дросельної системи визначити ту з областей, де нерівність теплових еквівалентів потоків забезпечить мінімальні втрати в регенеративному теплообміннику.

3. Показана недоцільність нарощування поверхні теплопередачі регенеративного ТО для підвищення холодопродуктивності дросельного рефрижератора в ситуаціях, коли зовнішній тепло-

приток до вказаного апарата і осьові перетоки тепла по елементах його конструкції вже домінують у структурі втрат РТО.

4. Розроблено оригінальний алгоритм і методику числового перевірного розрахунку протитокових ТО, що гарантують успішне завершення ітераційного процесу практично незалежно від вибору початкових розподілів температур і придатні для розрахунку теплообмінника у складі криогенної системи.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Гетманец В.Ф., Горпинко Ю.И., Левин А.Я. Вопросы тепловой оптимизации противоточных теплообменников криогенных установок. "Cryogenics - 90" 1-st Intern.Conf. about technique of low temperature, Kosice, 1990, p. 236-237.

2. Горпинко Ю.И., Гетманец В.Ф., Лобко М.П., Якуба В.В. Повышение холодопроизводительности дроссельных микрокриогенных систем на основе смесового рабочего тела. Повышение эффективности и надежности систем городского хозяйства. - К.: ИСИО, 1995.- С. 134-138.

3. Горпинко Ю.И., Шульга Н.А. Повышение эффективности перекрестно прямоточных утилизаторов. Эксплуатация и ремонт зданий и сооружений городского хозяйства. - К.: ИСИО, 1995.- С. 87-90.

4. Гетманец В.Ф., Горпинко Ю.И., Левин А.Я. Проблемы расчета высокоэффективных теплообменников. // Тез. докл. междунар. конф. "Криогеника -91". - М.: ЦИНТИ Химнефтемаш, 1991. С. 137.

5. Гетманец В.Ф., Горпинко Ю.И., Левин А.Я., Юрченко П.Н. Математическое моделирование немагнитного криостата со встроенным ожижителем // Тез. докл. междунар. конф. "Криогеника-91". - М.: ЦИНТИ Химнефтемаш, 1991. - С. 117.

6. Горпинко Ю.И. Дополнительная возможность оптимизации дроссельных систем криостатирования. // Тез. докл. XXVIII науч.-техн. конфер. препод., асп. и сотр. ХГАГХ. Строительство и экология.- Харьков, 1996. - С. 60.

АННОТАЦИЯ.

Горпинко Ю.И. Повышение холодопроизводительности дроссельных рефрижераторов оптимизацией параметров и потерь регенеративного теплообменника. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.05 - Теоретическая теплотехника, Харьковская государственная академия городского хозяйства, г. Харьков, 1997 год.

Защищаются шесть научных работ, которые содержат результаты исследований высокоэффективных криогенных теплообменников и дроссельных рефрижераторов на азотный и гелиевый уровни температур. Разработаны оригинальный алгоритм и методика поверочного расчета противоточных ТО, которые гарантируют успешное завершение итерационного процесса практически независимо от выбора начальных приближений. Установлено, что потери холодопроизводительности дроссельного рефрижератора могут быть значительно уменьшены использованием избыточности теплового эквивалента одного из потоков рабочего тела в регенеративном теплообменнике. Показана нецелесообразность наращивания поверхности теплопередачи регенеративного ТО для повышения холодопроизводительности дроссельного рефрижератора в ситуациях, когда внешний теплоприток к указанному аппарату и осевые перетечки по элементам его конструкции являются доминирующими в структуре потерь этого теплообменника.

Gorpinko Yu.I. The increase of cool capacity of trottle refrigerators by optimizing the parameters and losses of regenerating heat exchanger. Thesis for master's degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.14.05 - Theoretical heat engineering, Kharkov state academy of municipal economy, Kharkov, 1997.

Six scientific works are submitted, which contain research results on highly efficient cryogenic heat exchangers and trottle refrigerators at nitrogen and helium temperatures. Check-up calculations counterflow heat exchangers original algorithm and technique have been developed. They guarantee successful completion of iterative process practically irrespective of initial approach selection. It is found, that the cool capacity losses of trottle refrigerators may be substantially decreased by using thermal equivalent redundancy of one of the regenerating heat exchanger working body flows. It is shown, that there is no point in building up the heat exchange surface to increase trottle refrigerators cool capacity in cases, where the axial spreating of heat and external heat inflow to this apparatus are dominant among heat exchanger losses.

Ключові слова: дросельна система охолодження, регенеративний теплообмінник, недорекуперація, вторинні ефекти.

Відповідальний за випуск
Підп. до друку 18.03.97.
Обл. -друк. арк. 0.9.
Ум. друк. арк. 1.00.
Замовл. №

к.т.н., проф. Шульга М.О.
Формат 60x90 1/16.
Папір друк. №1.
Тираж 100 прим.

Сектор оперативної поліграфії ІОЦ ХДАМГ
ХДАМГ, 310002, м. Харків, вул. Революції, 12.