

Автореферат  
Б87

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

БРАЙЛОВСЬКИЙ Яків Львович

УДК 621.6.001.621.59,  
536.242.001.5

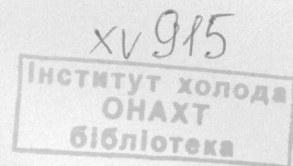
НАУКОВІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ ЕФЕКТИВНИХ І НАДІЙНИХ СИСТЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
КРІОГЕННИМИ РІДИНАМИ І ГАЗАМИ

Спеціальність 05.05.14-Холодильна і криогенна техніка, системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук



Дисертація є рукопис.

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

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор,  
лауреат Державної премії УРСР,  
заслужений діяч науки УРСР  
Наєр Вячеслав Андрійович,  
завідувач кафедри кріогенної техніки  
Одеської державної академії холоду

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор  
Гетманець Володимир Федорович,  
начальник відділу СКТБ кріогенної  
техніки ФТІНТ ім Б.І. Веркіна НАНУ

доктор технічних наук, професор  
Дорошенко Олександр Вікторович,  
професор кафедри термодинаміки  
Одеської державної академії холоду

доктор технічних наук, професор,  
Юферов Володимир Борисович,  
начальник лабораторії кріогенної електрофізики  
Національного наукового центру Харківського  
фізико-технічного інституту

Провідна установа – НВО «Шторм», міністерство промислової  
політики України, м. Одеса

відбудеться « 19 » Квітня 2001 р. о 11 годині  
у спеціалізованій вченій раді Д 41.087.01 при Одеській  
академії холоду за адресою: 65026, м. Одеса, вул. Дворянська, 1/3.

Зробити в бібліотеці ОДАХ (65026,

2001 р.

Д 41.087.01

В.І. Мілованов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Кріосистеми «резервуар-насос» (КСРН) є невід'ємною складовою частиною комплексів зберігання, транспортування і газифікації продуктів розділення повітря і низькотемпературних зріджених газів. У зв'язку з розвитком ряду галузей виробництва та застосування нових робочих тіл відчувається необхідність у розширенні їх використання. Тому своєчасним являється створення наукових основ КСРН та методів їх розробки для різних систем та режимів роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертація пов'язана з виконанням: тематичного плану науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт НДХІММАШ 1972-1973 рр. по створенню магістральних кріогенних трубопроводів; держбюджетній тематики і контрактів НДТКРІОГЕНМАШ 1986-1995 рр. по розробленню і впровадженню насосів для зріджених газів і насосних кріогазифікаторів.

Мета і задачі роботи. Метою роботи є рішення наукової проблеми, пов'язаної з розробкою теоретичних основ КСРН, систематизацією існуючих та нових схемних рішень, спрямованих на забезпечення запланованих показників призначення та на зниження витрат при впровадженні у виробництво. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити нові схеми з показниками призначення, що плануються, та класифікатор існуючих та перспективних схем;
- вивчити теплообмінні процеси в резервуарі та насосі і створити математичні моделі нових схемних рішень;
- дослідити теплові мости елементів обладнання КСРН та розробити узагальнену теорію теплопровідності;
- розробити стенди по визначенню основних характеристик КСРН, провести експериментальні дослідження та перевірити отримані математичні рішення;
- створити надійні системи захисту насосу і лінії нагнітання;
- розробити практичні заходи зниження загальних витрат при впровадженні КСРН у виробництво.

Наукова новина дисертації є в тому, що автором вперше поставлені і вирішені різні задачі підвищення ефективності елементів і в цілому кріогенних систем «резервуар-насос», які у комплексі складають наукові основи КСРН і їх проектування з показниками призначення, що плануються.

Отримані автором експериментальні і розрахункові результати, більша частина яких являється новими, сукупно з науковими положеннями дозволяють теоретично узагальнити і вирішити актуальну наукову проблему, яка має важливе народно-господарське значення.

Наукові положення, які захищаються у роботі:

1. Аналіз характеристик існуючого обладнання та розробка перспективних схемних рішень КСРН повинні проводитись з використанням класифікатора, який враховує зовнішню компоновку обладнання та циркуляцію витоку, що протікає через поршневе ущільнення насосу.
2. Математичні моделі різних схемних рішень КСРН, що враховують, в основному, внутрішні процеси тепломасообміну у резервуарі та насосі, дають можливість встановлювати оптимальний характер змін кавітаційної стійкості системи за часом.
3. Досягнутий в теперішній час рівень якості теплоізоляції криогенних резервуарів обумовлює вибір математичної моделі теплових мостів з неединичними безперервно діючими джерелами тепла.

Зокрема цього автор захищає:

1. Різні схемні рішення, які дають можливість підвищити кавітаційний запас рідини, яка всмоктується, знизити втрати рідини, підвищити тривалість безперервної роботи.
2. Загальну теорію теплових мостів КСРН для одиничних тіл, контактних з'єднань та з'єднань розділених газовим прошарком.
3. Математичні моделі схемних рішень та методику показників призначення, що плануються.
4. Системи надійної експлуатації КСРН: захист насосу від зриву подачі та гасіння пульсацій тиску нагнітання.
5. Результати експериментальних досліджень КСРН на криопродуктах та моделюючих рідинах з використанням різних НСГ, в тому числі з безредукторним приводом.
6. Стенди та методики проведення експериментальних досліджень КСРН, що працюють по різних схемах з використанням різних теплових мостів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Запропоновані модифікації схем КСРН з різними варіантами повернення витоку дозволяють створювати системи з більш високими показниками призначення.
2. Розроблені системи захисту НСГ від зриву подачі і гасителя пульсацій тиску у лінії нагнітання високого тиску дають можливість підвищити ефективність та надійність обладнання при роботі у широкому діапазоні режимних параметрів, які характерні для КСРН високого тиску.
3. Обґрунтовано проведення випробувань НСГ на більш дешевій моделюючій рідині (воді) та використання розробленого компактного НСГ з безредукторним приводом.

Публікації. Результати досліджень опубліковано в 27 статтях, 22 доповідях і тезах, а також у 4 авторських свідоцтвах на винаходи.

Випробування результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень викладені у 53 друкарських роботах, в тому числі на 17 міжнародних конгресах і конференціях, що проходили в США, Англії, Нідерландах, Чехії, Італії, Угорщині, Австралії, Росії, Україні.

Особистий внесок автора підтверджують 33 самостійні наукові публікації. В них приведені нові практичні розробки, створені математичні моделі і експериментальні дослідження схемних рішень КСРН, НСГ і теплових мостів. Особистий внесок автора у роботах, що написані у співавторстві:

[1], [34] - аналіз випадків небезпечної експлуатації криосистем.

[2] - експериментальні дослідження та розробка конструкції систем захисту насосу для зріджених газів та комунікацій високого тиску.

[3],[4] - розробка математичної моделі схемних рішень криогенних систем, проведення експериментальних досліджень.

[13], [15], [19], [23], [37] - розробка математичної моделі теплових мостів криогенних систем, проведення експериментальних досліджень.

[25] - експериментальні дослідження насосів для зріджених газів на моделюючих рідинах, експериментальні дослідження насосів для зріджених газів з безредукторним приводом.

[28] - розробка установки для відкачування рідкого криопродукта.

[29] - експериментальні дослідження та розробка конструкції системи захисту насосу для зріджених газів.

[30] - експериментальні дослідження та розробка конструкції гасителя пульсацій високого тиску для криогенних систем.

[31] - експериментальні дослідження та розробка конструкції демпфера високого тиску для криогенних систем.

[32], [38] - експериментальні дослідження та математичне моделювання НСГ;

[33] - розробка та дослідження установки тривалого зберігання рідкого двоокису вуглецю;

[43], [45] - розробка та математичне моделювання перспективних схем КСРН.

Об'єм і структура дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури, додатків і містить 314 сторінок, включаючи 94 малюнки, 9 таблиць і 257 найменувань бібліографії.

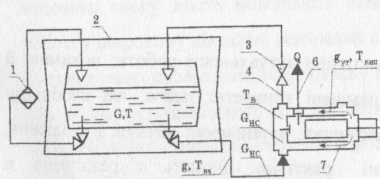
## КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі маємо обґрунтування наукової і практичної актуальності роботи; показано її зв'язок з науковими програмами; визначена мета і намічені конкретні задачі, які необхідно виконати для її досягнення; сформульовані наукові положення; встановлені об'єкти досліджень; показана наукова новина результатів; підтверджені практична цінність і реалізація в промисловості.

У першому розділі розглянуто стан питання: перспективи застосування КСРН; особливості конструкції і експлуатації; схемні рішення; математичне моделювання схемних рішень, систем захисту насоса і теплових мостів; сформульовані задачі дисертації.

Необхідність досліджень КСРН зумовлена постійно зростаючою потребою розширення асортименту систем забезпечення рідкими і газоподібними продуктами різного температурного рівня. Вона пов'язана з розвитком традиційних і появою ряду нових галузей виробництва, що використовують в технологічних лініях нові робочі середовища. Розвиток КСРН в основному йшов в напрямі конструкторських розробок. Менш вивченими залишаються проблеми створення схемних рішень. Існуючі схеми КСРН вже не цілком задовольняють сучасним потребам. Необхідна розробка нових схем.

Принцип роботи КСРН, що складається з резервуара низького тиску і поршневого насоса високого тиску, полягає в ефективній їх взаємодії, заснованій на надходженні в насос рідини з досить високим кавітаційним запасом. У традиційних схемах, що широко застосовуються, в зв'язку з їх недоліками, досягнути цього вдається далеко не завжди. До цього часу найбільше поширення отримали схеми 1 і 2, відповідно з поверненням всього витoku або тільки рідкої її частини в резервуар. Вони найбільш прості, легко реалізуються і можуть бути віднесені до основних схем. Незважаючи на трохи менше поширення, до основних схем можуть бути також віднесені схеми 3, 4 і 5, відповідно з поверненням всього витoku на всмоктування, нагнітання НСГ або в сторонню місткість. Недоліки вказаних схем є основою для розробки їх більш ефективних модифікацій. У ряді патентоздібних схем для цього пропонуються різноманітні засоби: зменшення витoku, повернення витoku в додаткову ємкість і інші. Однак схеми, що пропонуються, дуже складні. Нові схеми повинні бути високоефективними, мати прості рішення і відповідати своєму призначенню, забезпечувати показники, що плануються. На мал. 1, 2 приведені розроблені автором патентоздібні схеми, в яких виключені втрати рідкого продукту відповідно під час роботи і після повної зупинки КСРН. У першому випадку це досягається за рахунок установки зворотного клапана, нормально відкритого у бік резервуара, або регулювальника тиску.



Мал. 1. Схема КСРН без втрат.

1- випарник підйому тиску в резервуарі; 2- резервуар; 3- регулювальник тиску; 4- лінія зв'язку по газу; 5- лінія всмоктування; 6- лінія нагнітання; 7- лінія витoku.

Мал. 2. Схема КСРН з розвантаженим резервуаром і двома всмоктуючими клапанами.

1- витратна ємкість; 2- насос; 3- випарник підйому тиску в ємкості; 4- лінія всмоктування; 5- лінія нагнітання; 6- додатковий всмоктуючий клапан; 7- лінія витoku; 8- лінія скидання пару; 9- запобіжний клапан.

При цьому відбувається автоматична підтримка тиску в резервуарі і відповідає необхідність скидання з нього пару під час роботи. У другому випадку установка у всмоктуючій камері насоса додаткового клапана приводить до можливості використання розвантаженого резервуара, тобто резервуара під атмосферним тиском. Після повної зупинки КСРН виключаються втрати, пов'язані зі скиданням пару з резервуару, оскільки в ньому при цьому не знижується тиск. Обидві схеми легко реалізуються на практиці. На відміну від схеми фірми Стюотес, переслідуючої ту ж мету: створення кавітаційного запасу рідини безпосередньо у всмоктуючій камері насоса, в схемі на мал. 1 вдається уникнути складної конструкції поршня (з примусовим диском для підтиснювання рідини у всмоктуючій камері) і наявності ущільнення високого тиску з боку всмоктуючої камери.

Виключно значущими для стійкої роботи КСРН є системи захисту НСГ від зриву подачі і від пульсацій тиску і витрати. Існуючі способи виявлення зриву подачі недостатньо надійні. Способи зниження пульсацій, що пропонуються, незважаючи на патентну чистоту, можуть бути використані в основному у вузькому діапазоні зміни режимних параметрів або при їх незмінності в процесі експлуатації НСГ. При роботі на змінних режимах робочого тиску необхідні гасителі пульсацій тиску і втрати, що охоплюють широкий спектр частот і тиску. Трудність підбору готових конструкцій диктує необхідність спеціальних розробок гасителів.

Важливим фактором, стримуючим застосування нових схем, є відсутність моделі прогнозування залежності кавітаційного запасу рідини, що всмоктується від часу. Проблеми математичного моделювання схем КСРН пов'язані не стільки з труднощами опису теплообмінних процесів в кожному об'єкті, скільки зі складністю їх взаємозв'язку, так як температурні умови кожного попереднього об'єкта, що самі по собі описуються досить складними рівняннями, є початковими даними для пов'язаного з ним подальшого об'єкта, тобто має місце абсолютно очевидний факт наростаючої складності. Існуючі розробки математичних моделей окремих об'єктів не вирішують питання. Вони відносяться до режимів зберігання, випорожнення і наповнення резервуарів. Для насосів розроблена наближена залежність, заснована на термодинамічному аналізі. Теоретичні дослідження поповнилися авторськими розробками розрахунку коефіцієнта подачі насоса для поршневих ущільнень з урахуванням турбулентності протікаючих потоків і розрахунками процесу заповнення газом балонів високого тиску. Однак для проведення аналізу теплообмінних процесів у взаємопов'язаних об'єктах КСРН необхідно розробити точні математичні моделі для численних модифікацій основних схем і визначити найбільш важливі втрати кріопродукта. У зв'язку з новими розробками назріла необхідність в систематизації схем КСРН минулих років, існуючих і перспективних, з тим, щоб

перейти до нових реальних схем. Математичне моделювання і систематизація схем повинні привести до більш обґрунтованого прогнозування і успішного впровадження КСРН у виробництво.

Теплові мости в КСРН є також важливими елементами, оскільки значною мірою визначають теплову ефективність резервуара, насоса і з'єднуючих їх трубопроводів. Конструкторські розробки направлені на створення теплових мостів з мінімальними теплоприпливами, теоретичні розробки-на створення математичних методів рішення і отримання самих рішень при різних граничних умовах. Рішенню задач теплопровідності присвячено чимало робіт. Найбільш повно вони наведені в роботах академіка Ликова. Однак більшість рішень в них відноситься до задач «чистої» теплопровідності. Лише в деяких випадках розглянути задачі з одним джерелом тепла. До них, передусім, треба віднести задачі для напівобмеженого і обмеженого стержня при межових умовах III роду без теплової ізоляції бічної поверхні. Умови, що розглядаються, не характерні для теплових мостів КСРН. Це ж торкається задачі для необмеженого порожнистого циліндра з теплообміном бічних поверхонь згідно із законом Ньютона і для напівобмеженого стержня з внутрішнім безперервно діючим джерелом тепла постійної потужності. Крім того, відсутні рішення для теплових мостів, що зображують собою контактні і безконтактні з'єднання тіл. Таким чином, незважаючи на досить великий накопичений матеріал по теорії теплопровідності, він передусім, відноситься до задач «чистої» теплопровідності, або до задач з одним джерелом тепла при умовах теплообміну, не характерних для теплових мостів КСРН. Для теплових мостів КСРН найбільш характерними є межові умови I і III роду. При цьому мають місце єдині тіла, контактні і безконтактні з'єднання з безперервно діючими джерелами тепла. У зв'язку з цим для узагальнення теорії теплопровідності застосовно до теплових мостів КСРН необхідно сформулювати постановку і вирішити декілька типів задач для реальних умов теплообміну з неединичними безперервно діючими джерелами тепла як для єдиничних тіл, так і для з'єднань.

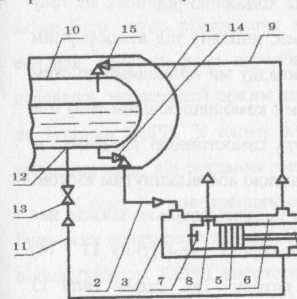
З першочергових практичних задач найбільш важливими є завжди актуальні дослідження, що забезпечують зниження витрат.

З проведеного аналізу витікає необхідність:

- розробки наукового напрямку, пов'язаного зі створенням теоретичних основ КСРН, в тому числі схемних рішень і теплових мостів;
- практичних розробок нових схем КСРН і окремих його елементів.

Другий розділ присвячено практичним розробкам схем, класифікатору схем і систем захисту елементів КСРН. Створити універсальну схему, однаково ефективну при різних умовах експлуатації практично неможливо. Тому доцільно вести розробки схем, призначених для використання у конкретних умовах з плануванням найбільш важливого показника призначення,

наприклад, довготривала тривалість безперервної роботи, мінімальних втрат кріопродукта та інші. Як приклад на мал.3 приведена розроблена автором схема 1а, що є модифікацією схеми 1.



Мал.3. Схема КСРН з поверненням всього витoku у рідину резервуару.

1-резервуар, 2-лінія всмоктування, 3-насос, 4-камера скидання витoku, 5-поршневе ущільнення, 6-охолоджуюча камера насоса, 7-усмоктуючий клапан, 8-нагнітальний клапан, 9-лінія зв'язку по газу, 10-парова порожнина резервуару, 11-лінія відведення рідкого витoku, 12-нижня точка резервуару, 13-зворотний клапан, 14,15-запорні клапани.

Доцільність повернення рідкого витoku в паровий простір резервуара в схемі 1 сумнівна, оскільки витік в більшості випадків буде представляти собою залишок рідини, що не викачується з резервуара. Щоб уникнути цього, може бути використана схема 1а, в якій лінії відведення рідкого і парового витokів з насоса в резервуар розділені: паровий трубопровід залишився таким же, як в схемі 1, а рідкий- підведено до нижньої частини ємкості, тобто до рідини. На

цьому трубопроводі встановлено зворотний клапан, нормально відкритий у бік ємкості. Завдяки такому компонованню відбувається добре перемішування витoku з основною рідиною в резервуарі і вона придбає достатній для подальшого відкачування кавітаційний запас. Збільшується

корисний об'єм ємкості. Однак повернення всього витoku (рідкого і парового) доцільне в тих випадках, коли це не призводить до розбалансу тиску у резервуарі. У іншому випадку повинні бути використані інші модифікації схеми 1, наприклад, з розділенням парового витoku на дві частини, одна з яких прямує у рідину резервуару (низ), а друга у паровий простір (верх), що призводить до схеми 1аМ. Можливо також інше розділення парового витoku: одна частина прямує у паровий простір резервуара, а друга-у всмоктуючу камеру насоса, тобто приходимо до схеми 1аМЗ. Обидві розроблені модифікації можуть бути досить ефективні при певних режимних параметрах. Можна також запропонувати модифікацію схеми 1 з розділенням парового витoku на дві частини з поверненням в рідину резервуару і у всмоктуючу камеру насоса (схема 1аМ2). Ця схема в деяких випадках може виявитися корисною. Модифікації схеми 2, ті, що приводять до усунення втрат рідкого кріопродукта під час роботи (схема 2а) або до їх зниження після остаточної зупинки КСРН (схема 2аМ) можуть знайти більш широке застосування, ніж їх основний аналог. До особливої групи відносяться схеми типу 5 з двома резервуарами: що спорожнюється, в якому зберігається рідина, і що наповнюється, в який скидається витік. У них усувається проблема, пов'язана з підігріванням основної рідини, можливе перемикання роботи з того, що спорожнюється на резервуар, що наповнюється, але вони ускладнені наявністю другого резервуара. При проведенні тривалих безперервних випробувань обладнання КСРН зручні схеми з

гарантованим кавітаційним запасом рідини, що всмоктується. У цьому випадку використовують додаткове природне охолодження за рахунок теплообміну з більш холодною рідиною. Як таку рідину частіше за все використовують ту ж рідину, що всмоктується, киплячу під атмосферним тиском, або дросельноємий до атмосферного тиску витік. У цьому випадку ми приходимо до схем типу 7,8,10...12. Причому відзнака цих схем полягає в тому, що вони є комбінацією схем типу 6 зі схемами відповідно типу 1...5. Схеми типу 6 практично не мають самостійного значення, за винятком систем ПРУ, де охолодження здійснюється кубовою рідиною або відкинутим азотом. Вони можуть бути віднесені до схем з природним охолодженням умовно, оскільки завжди має місце незначний надмірний тиск. Аналогічні міркування по інших групах схем (типу 13 і 14) також свідчать про різноманітність компонування і циркуляції витoku. Так, схеми типу 13 компонуються одним або двома резервуарами, але з одним заглибним насосом, а схеми типу 14 двома насосами - заглибним і виносним. При цьому циркуляція витoku в заглибних насосах ідентична.

Таким чином варіантність схем по групах повинна виконуватися у залежності від компонування обладнання і організації циркуляції витoku. Нижче приведено уперше розроблений класифікатор основних схем КСРН і їх модифікацій (мал.4). До нього входять схеми існуючі, що застосовуються, а також запропоновані автором і описані вище, схеми з штучним охолодженням рідини у резервуарі за рахунок підйому тиску в ньому і з природним - при безпосередньому теплообміні з більш холодною рідиною або газом.

Важливим фактором, що стримує впровадження схем, є трудність їх реалізації. Практична реалізація схем пов'язана передусім з організацією повернення парового і рідкого витoku. У схемі 1 повернення витoku здійснюється по єдиному трубопроводу у верхню частину резервуару (тобто у паровий простір). У схемі 1а весь рідкий і паровий витoki повинні повертатися в рідину. Для цього досить трубопровід опустити на дно резервуару. У схемі 1аМ, у зв'язку з поверненням у резервуар дозованої порції пару, необхідно у трубопроводі, що підводить до резервуару, зробити відгалуження у верхню (парову) частину з обов'язковою установкою регулювальника тиску з тим, щоб відбувалося закриття клапану у момент досягнення необхідного тиску. Тобто необхідний додатковий регулюючий орган. Розглянуті схеми відносяться до першої групи і їх реалізація не викликає особливих ускладнень, хоч і пов'язана з додатковою комплектацією регулювальника тиску, що здорожує установку. Переходимо до схем 1аМ3 і 1аМ2-другої групи. Схема 1аМ3 по трудності реалізації схожа зі схемою 1аМ, оскільки повернення парового витoku в усмоктуючу камеру насоса (що відрізняє її від схеми 1аМ) відбувається по свердленням у циліндровій групі, спеціально передбаченим для цього випадку. У насосах типу 2НСГ такі свердлення передбачені для деяких модифікацій. Тому це не призводить до дорожчання виробу.

Схема 2 не вимагає ніяких удосконалень і легко реалізується зі стандартним комплектуючим обладнанням КСРН. Схема 2а по реалізації аналогічна схемі 1аМ3. Схема 2аМ може бути легко реалізована за рахунок заміни регулювальника тиску на ручний запорний вентиль, оскільки вона передбачає повернення у резервуар порції пару витoku, трохи менш дозованої, затухаючий режим до тиску в резервуарі і призначена для роботи в режимі близькому до зупинки КСРН. У цьому випадку поступове зниження тиску перед зупинкою забезпечить зниження втрат від скидання пару так як тиск в ньому знижується.

Схема 3-з поверненням всього витoku в усмоктуючу камеру насоса легко реалізується без будь-яких додаткових заходів. Схема 4-з поверненням всього витoku у лінію нагнітання суворо не відноситься до КСРН високого тиску, так як допускає тиск нагнітання до 5 МПа, але легко реалізується без будь-яких додаткових заходів і призводить до підвищення подачі насосу.

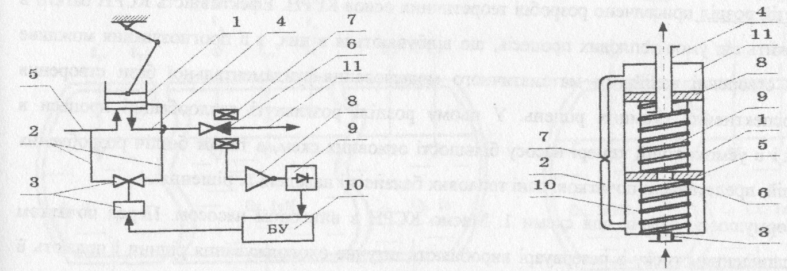
Схеми типу 5, крім сторонньої місткості, не вимагають ніякого додаткового обладнання і легко реалізуються на практиці. Вони вигідні з точки зору поліпшення температурних умов у резервуарі, що спорожнюється, але зручні для застосування тільки на виробництвах, що мають у своєму розпорядженні ємкості такого типу в достатній кількості.

Схеми типу 9-з локальним підвищенням тиску безпосередньо в усмоктуючій камері насоса, не вимагають надмірного тиску в судині, що вигідно відрізняє їх від інших розглянутих схем. Вони легко реалізуються на практиці, але мають ряд інших недоліків.

Таким чином, розроблений класифікатор схем КСРН, проведений аналіз реалізації нових схемних рішень, заснований на досвіді, повинні сприяти прискоренню впровадження перспективних схем в найближчому майбутньому.

КСРН як об'єкти підвищеної небезпеки через високі тиски, низькі температури і вогнебезпечні середовища потребують ретельного опрацювання систем захисту. На мал.5 і 6 приведені розроблена система захисту НСГ від зриву подачі і система гасіння пульсацій тиску лінії нагнітання. Система захисту працює таким чином. При періодичному прощтовхуванні поршневою групою через нагнітальний клапан порції рідини, затвор його здійснює коливальне рушення відносно котушки індуктивності, розташованої навколо немагнітного корпусу насоса. При цьому в котушці індуктивності виникає ЕДС, яка потім посилюється на підсилювачі, випрямляється на детекторі і поступає на блок управління, що формує сигнал на наявності ЕДС на котушці індуктивності блок управління не дає сигналу на відкриття перепускного клапана. При зриві роботи НСГ нагнітальний клапан не відкривається, в котушці датчика не створюється ЕДС і блок управління формує сигнал на відкриття перепускного клапана

що виконує продування поршневої групи і "запуск" в роботу її нагнітального клапана. Сигнал з блоку управління на відкриття перепускного клапана має вигляд імпульсу тривалості, що задається. Після проходження імпульсу через керуючий пристрій перепускного клапана система захисту повертається в початковий стан і якщо запуск поршневої групи НСГ не стався, то цикл продування по описаній вище схемі повторюється. Представлена система захисту дозволяє автоматично виводити НСГ із зриву в нормальний режим роботи, при цьому система автоматично переходить в "чекаючий" режим роботи і не вимагає втручання людини. Схema може бути використана також в системах заправників високого тиску, коли при закінченні заповненні ємкості, по досягненні заданого тиску, відкривається лінія байпасування НСГ і він працює до його вимкнення сам на себе. Схema проста, надійна в роботі і пройшла випробування на промисловому стенді.



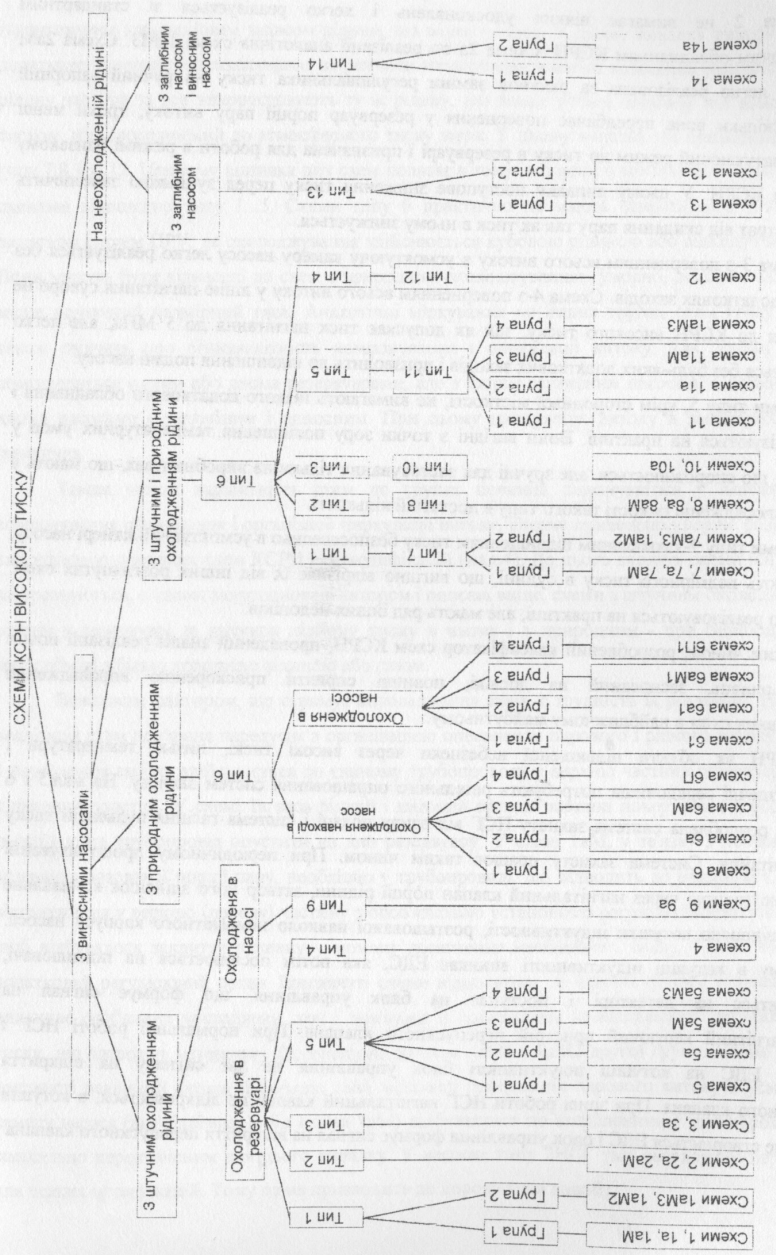
Мал.5. Система захисту поршневого насоса від зриву подачі.

1- поршнева група; 2- лінія продування; 3- перепускний клапан з керуючим пристроєм; 4,5- напірний і всмоктуючий трубопроводи; 6- нагнітальний клапан; 7- котушка індуктивності; 8- підсилювач; 9- детектор; 10- блок управління; 11- напірна лінія.

Мал.6. Система гасіння пульсацій тиску.

1- корпус; 2- обводний канал; 3,4- вхідний і вихідний патрубки; 5,6- підпружинений поршень з отвором; 7- дросель; 8-наполегливий поршень; 9,10- пружини; 11- порожнина для керуючого поршнем (8) тиску.

Гаситель працює таким чином. Потік рідини, той, що поступає по вхідному патрубку, проходить через дроселюючі отвори поршня і виходить через вихідний патрубок. Пульсації тиску рідини при цьому гасяться завдяки пружній установці поршня. Здійснюючи під впливом пульсації тиску вимушені коливання, поршень розсіює надмірну енергію і стабілізує тиск після гасителя. Надмірна енергія розсіюється за рахунок тертя поршня по стінках корпусу і за рахунок пружного стиснення або розтягнення пружин, а також дроселюванням потоку рідини через отвори у поршні. У разі підвищення середнього рівня тиску на вхідному патрубку переміщення поршня до вихідного патрубку виключається за рахунок обвідного каналу з дросельним елементом, що забезпечує гасіння змінної складової пульсуючого тиску в необхідному діапазоні перепадів тиску



Мал. 4. Класифікатор схем КСРН високого тиску.

на поршні. Дросельний елемент виключає проходження змінної складової тиску по обвідному каналу. У разі роботи гасителя на резонансному режимі забезпечується найбільша ефективність гасіння пульсацій тиску потоку рідини. Регулювання тиску в порожнині за допомогою обвідного каналу з дросельним елементом дозволяє автоматично підтримувати необхідний режим роботи при зміні середнього рівня тиску на вході в гаситель. Додатковий поршень забезпечує необхідну підпругу пружин, а також гасіння низькочастотних коливань тиску рідини в корпусі гасителя. Представлену конструкцію гасителя рекомендується використати у разі гасіння коливань тиску з широким спектром частот пульсацій тиску.

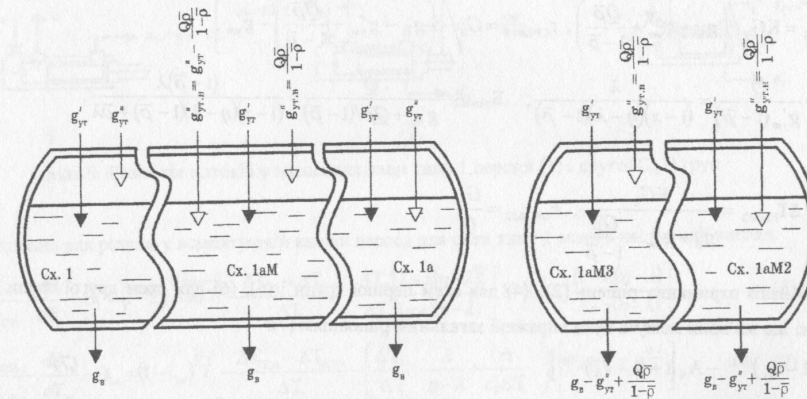
Таким чином, розроблені прості і зручні для практичного застосування модифікації основних схем, уперше представлено класифікатор КСРН і перевірені запропоновані системи захисту насосу і гасіння пульсацій тиску в нагнітальній лінії.

Третій розділ присвячено розробці теоретичних основ КСРН. Ефективність КСРН багато в чому залежить від умов теплових процесів, що відбуваються в них, а її прогнозування можливе лише при створенні надійного математичного моделювання-фундаментальної бази створення нових перспективних схемних рішень. У цьому розділі розглянуті теплообмінні процеси в резервуарі і в всмоктуючій камері насоса більшості основних схем, а також безліч розроблених модифікацій, представлені початкові дані теплових балансів і наведені їх рішення.

Сформулюємо задачу для схеми 1. Маємо КСРН з виносним насосом. Перед початком роботи підвищення тиску в резервуарі виробляють штучне охолодження рідини і подають її для охолодження насоса і комунікацій. У початковий момент часу температура охолодженої рідини відповідає  $T_0$ -температурі кипіння при атмосферному тиску. Рідина відкачується НСГ з резервуару з масовою швидкістю  $g = g_B - g'_{ym}$ . Весь витік, що протікає через поршневе ущільнення,  $g_{ym} = g'_{ym} + g''_{ym}$ , повертається у всмоктуючу камеру насоса при температурі  $T_{кп}$ , відповідній надмірному тиску у всмоктуючій камері насоса. Масова швидкість відкачки рідини насосом з всмоктуючої камери відповідає  $g_B = Q + Q_{yt}$ . Поточна і початкова маса рідини у резервуарі відповідає  $G_p, G_0^p$ . В всмоктуючій камері маса рідини підтримується постійною, рівною  $G_{nc}$ . Температура рідини, що поступає в всмоктуючу камеру насоса, відповідає  $T_{вх}$ . Теплоприпливи до рідини враховуються коефіцієнтами нагріву  $K_{nc} = Q_{oc}^{nc} / c_p' G_{nc}$ ,  $K_p = Q_{oc}^p / c_p' \cdot G_0^p$ , що характеризують темп підвищення її температури в резервуарі і в всмоктуючій камері НСГ, і відповідними підвищеннями температури рідини  $\Delta T_p$  і  $\Delta T_{nc}$ . При цьому приймаємо, що теплоприпливи з навколишнього середовища  $Q_{oc}^p = q_{исл} \cdot r$  не залежать від рівня рідини в резервуарі і є величиною постійною у часі. Це відповідає найбільш несприятливому випадку, коли  $G = G_0$ , тобто максимальному заповненню резервуара рідиною. Для всмоктуючої камери насоса теплоприпливи  $Q_{oc}$  включають також тепло стиснення. Підвищення температури рідини у

всмоктуючій камері насоса за рахунок перемішування основного потоку охолодженої рідини з киплячим рідким витоком визначається параметром  $B = g / g'_{ym}$ . Початковий кавітаційний запас рідини  $\Delta T_0 = T_{кп} - T_0$ . Час випорожнення резервуара і всмоктуючої камери складає відповідно  $\tau_{op}$  і  $\tau_{он}$ .

Формулювання задач для інших схем цього типу-першої (1,1 а, 1аМ) і другої груп (1аМ3,1 аМ2), відповідно з повним і неповним поверненням витоку у резервуар, аналогічні. Розподіл потоків в резервуарі для схем цього типу представлено на мал.7.



Мал.7. Розподіл потоків в резервуарі для схем типу 1.

Визначення дозованої порції парового витоку,  $g''_{ymB} = g''_{ymB} = \bar{p} / (1 - \bar{p}) Q$ , що призводить до усунення втрат під час роботи КСРН, здійснювалося моделюванням за основним чинником - незмінності тиску у резервуарі від часу. Необхідною умовою прийняте дотримання балансу об'ємів вхідних потоків і потоків, що виходять з резервуару.

З теплового балансу для маси рідини у резервуарі за період  $d\tau$  отримуємо наступні рішення для безрозмірного кавітаційного запасу для схем типу 1.

$$\Theta_1 = (1 - \bar{\tau}_1)^{\frac{(1-x)(\eta-\lambda)}{x(\eta-\lambda)-\lambda}} \cdot \frac{\Delta T_p}{\Delta T_0} \cdot \frac{\eta - (1-x)(\eta-\lambda)}{(1-x)(\eta-\lambda)} \left[ 1 - (1 - \bar{\tau}_1)^{\frac{(1-x)(\eta-\lambda)}{x(\eta-\lambda)-\lambda}} \right], \quad (2)$$

$$\Theta_{1a} = (1 - \bar{\tau}_{1a})^{\frac{\eta-\lambda}{\lambda}} - \left( \frac{\Delta T_p}{\Delta T_0} \cdot \frac{\lambda}{\eta-\lambda} + \frac{rx}{c_p' \Delta T_0} \right) \left[ 1 - (1 - \bar{\tau}_{1a})^{\frac{\eta-\lambda}{\lambda}} \right], \quad (3)$$

$$\Theta_{1ab1} = (1 - \bar{\tau}_{ab1})^{1/B_{1ab1}} - \left\{ \frac{\Delta T_p}{\Delta T_0} \cdot B_{1ab1} + \frac{r[x - \bar{p}B_{1ab1}(1-x)]}{c_p' \Delta T_0} \right\} \cdot \left[ 1 - (1 - \bar{\tau})^{1/B_{1ab1}} \right], \quad (4)$$

$$\Theta_{1aM3} = (1 - \bar{\tau})^{\frac{(1-x)(\eta-\lambda)(1-\bar{\rho})}{\lambda}} - \frac{\Delta T_p}{\Delta T_0} \cdot \frac{\lambda}{(1-x)(\eta-\lambda)(1-\bar{\rho})} \cdot \left[ 1 - (1 - \bar{\tau})^{\frac{(1-x)(\eta-\lambda)(1-\bar{\rho})}{\lambda}} \right], \quad (5)$$

$$\Theta_{1aM2} = (1 - \bar{\tau})^{\frac{\lambda \bar{\rho} + (1-x)(\eta-\lambda)(1-\bar{\rho})}{\lambda(1-\bar{\rho})}} - \frac{\Delta T_p + r \bar{\rho} / c'_p (1-\bar{\rho})}{\Delta T_0} \cdot \frac{(1-\bar{\rho})\lambda}{(1-x)(\eta-\lambda)(1-\bar{\rho}) + \bar{\rho}\lambda} \cdot \left[ 1 - (1 - \bar{\tau})^{\frac{\lambda \bar{\rho} + (1-x)(\eta-\lambda)(1-\bar{\rho})}{\lambda(1-\bar{\rho})}} \right]. \quad (6)$$

де  $\bar{\tau}_1 = \tau_1 / \tau_{OP1}$ ,  $\tau_{OP1} = G_0 / g$ ,  $B_1 = g / g'_{yt}$ ,  $\Delta T_p = KG_0 / g$ ,  $\bar{\tau}_{1a} = \tau_{1a} / \tau_{OP1a}$ ,  $\tau_{OP1a} = G_0 / Q = \tau_{OP1} g / Q$ ,  $B_{1a} = (g_B - g'_{ym}) / g'_{yt} = Q / g'_{yt} = B_3$ ,  $\Delta T_p^* / \Delta T_0 = KG_0 / g_B \Delta T_0$ ,  $\tau_{OP1aM} = G_0 / (1 - \bar{\rho}) Q$ ,

$$\bar{\tau}_{1aM} = \frac{\tau}{\tau_{OP1aM}} = \frac{\tau}{\tau_{OP1a}} \cdot (1 - \bar{\rho}) = \frac{\tau}{\tau_{OP1}} \cdot \frac{\lambda(1-\bar{\rho})}{\eta x + \lambda(1-x)}, \quad B_{1aM} = \frac{B_3}{1 - \bar{\rho}(B_3 + 1)}$$

$$\Delta T_{P1aM3} = KG_0 / \left( g_B - g'_{ym} + \frac{Q\bar{\rho}}{1-\bar{\rho}} \right); \quad \tau_{OP1aM3} = G_0 / \left[ \left( g_B - g'_{ym} + \frac{Q\bar{\rho}}{1-\bar{\rho}} \right) - g'_{ym} \right];$$

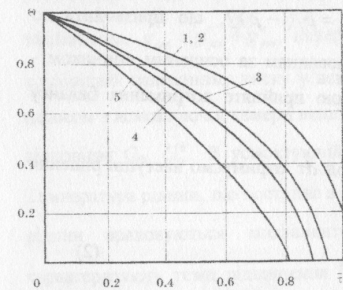
$$B_{P1aM3} = \frac{Q}{g'_{ym}(1-\bar{\rho})} = \frac{\lambda}{(1-x)(\eta-\lambda)(1-\bar{\rho})}; \quad B_{P1aM2} = \frac{Q}{g'_{ym} + Q\bar{\rho}/(1-\bar{\rho})} = \frac{(1-\bar{\rho})\lambda}{(1-x)(\eta-\lambda)(1-\bar{\rho}) + \bar{\rho}\lambda};$$

$$\Delta T_{P1aM2} = \frac{KG_0}{g_B - g'_{ym} + \frac{Q\bar{\rho}}{1-\bar{\rho}}}; \quad \tau_{OP1aM2} = \frac{G_0}{Q}$$

Аналіз отриманих рішень (2)...(4) для схем першої групи і (5), (6) для схем другої групи показує, що всі вони можуть бути виражені загальним рівнянням (7):

$$\Theta_{1i} = (1 - \tau_{1i})^{B_{1i}} - A_{1i} \left[ 1 - (1 - \bar{\tau}_{1i})^{B_{1i}} \right]. \quad (7)$$

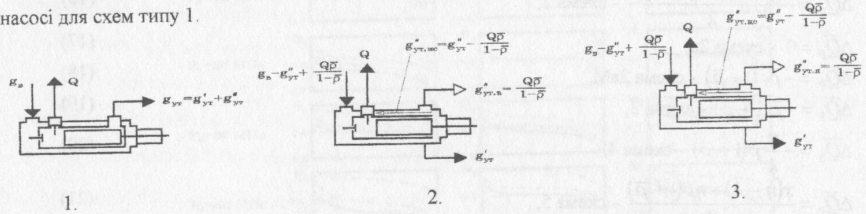
На мал. 8. наведені результати розрахунків за вказаних залежностей.



Мал. 8. Залежність безрозмірного кавітаційного запасу рідини в резервуарі від безрозмірного часу для схем типу 1 першої та другої груп. Робоча рідина-азот, тиск нагнітання  $P_H=40$ МПа, тиск всмоктування  $P_B=0,34$ МПа, 1-схема 1, 2-схема 1aM3, 3-схема 1aM2, 4-схема 1aM, 5-схема 1a.

З мал.8 впливає, що схема 1aM3 цілком успішно може суперничати з основною схемою 1, оскільки їх ефективність по кавітаційному запасу рідини приблизно однакова і в той же час найвища в порівнянні з іншими схемами. А схема 1aM2 має помітно більш високі показники в порівнянні зі схемою 1aM. Найменшу кавітаційну міцність має схема 1a. Однак аналіз буде неповним, якщо не провести порівняння по втратах рідкого продукту в цих схемах. Мова йде про найбільш важливі втрати через подачу або скидання пару з резервуару під час роботи КСРН. Розрахунки по рівняннях, які будуть розглянуті нижче показують, що найбільші втрати мають місце у схемі 1, тому

перевагу повинно бути віддано схемі, що порівнюється з нею 1aM3 без втрат. У схемах 1a і 1aM2 втрати приблизно однакові, не залежать від режимних параметрів і пов'язані з необхідністю випаровування частини рідини для подачі її у резервуар. Ці схеми поступаються схемі 1aM3 як за кавітаційну міцність, так і по втратах. Але схема 1aM2 набагато вигідніша схеми 1a і цілком конкурентоспроможна зі схемою 1aM, так як має велику кавітаційну стійкість при декілька більших втратах. Рішення  $\Theta = f(\bar{\tau})$  для рідини у резервуарі є початковими даними для визначення температури у всмоктуючій камері насоса. На мал.9 приведено розподіл потоків у насосі для схем типу 1.



Мал.9. Розподіл потоків у насосі для схем типу 1 першої (1) і другої (2,3) груп.

Рішення для рідини у всмоктуючій камері насоса для схем типу 1 мають наступний вигляд:

$$\frac{\tau_{OH1}}{\tau_{OB}} \cdot \frac{d\Theta_1}{d\bar{\tau}_1} + \Theta_1 = (1 - \bar{\tau}_1)^{\frac{(1-x)(\eta-\lambda)}{\lambda+x(\eta-\lambda)}} - \frac{\Delta T_{P1} + \Delta T_{HC1}}{\Delta T_0} \cdot \frac{\Delta T_{P1} [\lambda + x(\eta-\lambda)]}{\Delta T_0 (1-x)(\eta-\lambda)} \cdot \left[ 1 - (1 - \bar{\tau}_1)^{\frac{(1-x)(\eta-\lambda)}{\lambda+x(\eta-\lambda)}} \right], \quad (8)$$

$$\frac{\tau_{OH1a}}{\tau_{OB1a}} \cdot \frac{d\Theta_{1a}}{d\bar{\tau}_{1a}} + \Theta_{1a} = (1 - \bar{\tau}_{1a})^{\frac{\eta-\lambda}{\lambda}} - \frac{\Delta T_{P1a} + \Delta T_{HC1a}}{\Delta T_0} \cdot \left( \frac{\Delta T_{P1a}}{\Delta T_0} \cdot \frac{\lambda}{\eta-\lambda} + \frac{rx}{c'_p \Delta T_0} \right) \cdot \left[ 1 - (1 - \bar{\tau}_{1a})^{\frac{\eta-\lambda}{\lambda}} \right], \quad (9)$$

$$\frac{\tau_{OH1aM}}{\tau_{OB1aM}} \cdot \frac{d\Theta_{1aM}}{d\bar{\tau}_{1aM}} + \Theta_{1aM} = (1 - \bar{\tau}_{1aM})^{\frac{(1-\bar{\rho})\eta-\lambda}{\lambda}} - \frac{\Delta T_{P1aM} + \Delta T_{HC1aM}}{\Delta T_0} \cdot \left\{ \frac{\Delta T_{P1aM}}{\Delta T_0} \cdot \frac{\lambda}{\eta(1-\bar{\rho}) - \lambda} + \frac{r[x(1-\bar{\rho})(\eta-\lambda) - \bar{\rho}\lambda]}{[(1-\bar{\rho})\eta-\lambda]c'_p \Delta T_0} \right\} \cdot \left[ 1 - (1 - \bar{\tau}_{1aM})^{\frac{(1-\bar{\rho})\eta-\lambda}{\lambda}} \right]. \quad (10)$$

$$\frac{\tau_{OH3}}{\tau_{OB3}} \cdot \frac{d\Theta_{1aM3}}{d\bar{\tau}_{1aM3}} + \frac{B_{HC} + 1}{B_{HC}} \Theta_{1aM3} = \left( 1 + \frac{\Delta T_p}{\Delta T_0} \cdot B_p \right) (1 - \bar{\tau})^{1/B_p} - \frac{B_p \Delta T_p + \Delta T_{TP} + \Delta T_{HC} + r/B_{HC} c'_p}{\Delta T_0} \quad (11)$$

$$\frac{\tau_{OH}}{\tau_{OP}} \cdot \frac{d\Theta_{1aM2}}{d\bar{\tau}} + \frac{B_{HC} + 1}{B_{HC}} \Theta_{1aM2} = (1 - \bar{\tau})^{B_p} - B_p \frac{\Delta T_p + r \bar{\rho} / c'_p (1-\bar{\rho})}{\Delta T_0} \left[ 1 - (1 - \bar{\tau})^{B_p} \right] - \frac{\Delta T_p + \Delta T_{HC}}{\Delta T_0}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \Delta T_{HC}}{\partial \tau} = \frac{K_{HC} G_{HC}}{g_B - g'_{ym} + Q\bar{\rho}/(1-\bar{\rho})}, \quad \tau_{OH} = \frac{G_{HC}}{g_B - g'_{ym} + Q\bar{\rho}/(1-\bar{\rho})}, \quad B_{HC} = \frac{(1-\bar{\rho})\eta - x(\mu-\lambda)(1-\bar{\rho}) + \lambda\bar{\rho}}{x(\eta-\lambda)(1-\bar{\rho}) - \lambda\bar{\rho}}$$

Аналогічні рішення отримані також для інших типів схем: 2,3,4 і 5, що широко застосовуються і перспективні у найближчому майбутньому.

Для більш повної оцінки ефективності схем необхідно мати в своєму розпорядженні дані не тільки про температурні параметри продукційного потоку в резервуарі і насосі, але також знати

про втрати кріопродукта під час роботи КСРН. Нижче приведена залежність для визначення втрат, отримана на основі матеріальних балансів схем, і результати розрахунків по них для газифікатора, що випускається ГСГ-250/420.

1.  $\Delta \bar{Q}_p = \frac{x(\eta - \lambda)(1 - \bar{\rho}) - \lambda \bar{\rho}}{\lambda}$  - схема 1, (13)

2.  $\Delta \bar{Q}_p = -\bar{\rho}(1 + \bar{\rho})$  - схема 1a, схема 1aM2 (14)

3.  $\Delta \bar{Q}_p = 0$  - схема 1aM, схема 1aM3 (15)

4.  $\Delta \bar{Q}_p = \frac{x(\eta - \lambda)(1 - \bar{\rho}) - \lambda \bar{\rho}}{\lambda}$  - схема 2, (16)

5.  $\Delta \bar{Q}_p = 0$  - схема 2a, (17)

6.  $\Delta \bar{Q}_p = -\bar{\rho}^2(1 + \bar{\rho})$  - схема 2aM, (18)

7.  $\Delta \bar{Q}_p = -\bar{\rho}(1 + \bar{\rho})$  - схема 3, (19)

8.  $\Delta \bar{Q}_p = -\frac{\eta}{\lambda} \bar{\rho}(1 + \bar{\rho})$  - схема 4, (20)

9.  $\Delta \bar{Q}_p = \frac{x(\eta - \lambda) + \eta \bar{\rho}(1 + \bar{\rho})}{\lambda}$  - схема 5, (21)

10.  $\Delta \bar{Q}_p = \frac{x(\eta - \lambda) - \eta \bar{\rho}}{\lambda}$  - схема 5a, (22)

11.  $\Delta \bar{Q}_p = -\frac{\bar{\rho}(1 + \bar{\rho})(\eta - \lambda)(1 - x)}{\lambda}$  - схема 5aM, (23)

12.  $\Delta \bar{Q}_p = Q_{\theta} c'_p \Delta T_{охл} / r$  - схеми типу 6 (24)

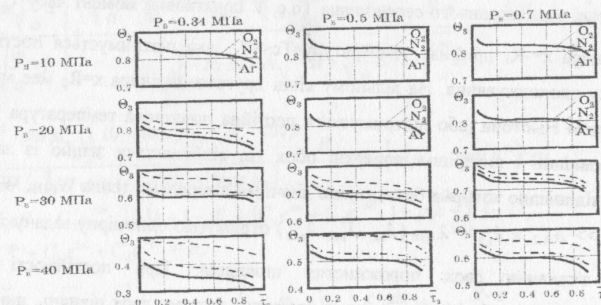
Таблиця 1.

Безрозмірні втрати  $\Delta \bar{Q}_p$  кисню у газифікаторі ГСГ-250/420

Схеми	Розрахункові параметри			
	$\Delta \bar{Q}_p^1$	$\Delta \bar{Q}_p^2$	$\Delta \bar{Q}_p^1$ , кг/ч	$\Delta \bar{Q}_p^2$ , кг/ч
1,2	0.0233	0.052	5.15	11.5
1a, 1aM2,3	-0.013	-0.013	-2.9	-2.9
1aM, 1aM3	0	0	0	0
2a, 5aM3	0	0	0	0
2aM	0.00017	0.00017	0.038	0.038
4	0.0187	0.0187	4.1	4.1
5	0.0179	0.046	3.96	10.16
5a	0.0181	0.0462	4.0	10.2
5aM	0.0053	0.0049	1.17	1.08
6	0.0428	0.0436	9.46	9.64

1,2- варіанти розрахунків: 1-Тв=92 К, 2-Тв=99 К. Знак (-) означає, що втрати пов'язані зі зниженням тиску у резервуарі. Таким чином, у схемах 1aM, 1aM3, 2a, 5aM, 5aM3 втрат немає. Розташування схем по наростаючих значеннях втрат має наступний вигляд: 1aM, 3,1 а, 2aM, 5aM, 4,1,2,5 а, 5,10,7,8. Достовірність розробленої методики розрахунку перевірена у експериментах, що проведені автором.

У тих випадках, коли необхідно мати тиск понад 42МПа, застосовують НСГ з двоступеневим стисненням. Однак, як показують розрахунки і експерименти, при тиску всмоктування 0.5...0.7 МПа можливе досягнення одноступеневого стиснення (мал.10). При цьому стиснення доцільно проводити у всмоктуючій камері. Це дозволить застосувати розвантажені резервуари.

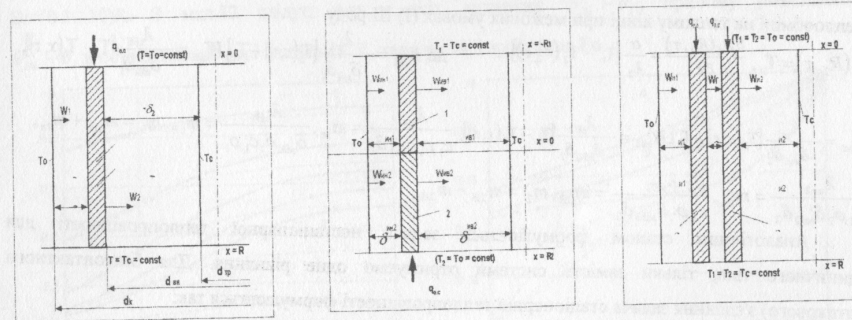


Мал.10. Залежність  $\Theta = f(\bar{p}, P_B, P_H)$  для схеми 3.  $\Delta T_p / \Delta T_0 = \Delta T_{КС} / \Delta T_0 = \Delta T_{ТР} / \Delta T_0 = 0.02$

— азот, ---- кисень, -.-.-.- аргон

Розроблені математичні моделі схемних рішень КСРН є теоретичною основою, що дозволяє прогнозувати характеристики існуючих систем та систем, що створюються.

У четвертому розділі наведена узагальнена теорія теплових мостів КСРН. У резервуарах, насосах і трубопроводах, що є основним обладнанням, розташовується мережа теплових мостів, яка може впливати значним чином на ефективність КСРН. Оскільки теплові



Мал.11. Схеми теплових мостів одиночних тіл (а), контактного (б) і безконтактного (в) з'єднань при межових умовах III (I) роду. мости, що застосовуються, зображують собою одиночні тіла, контактні і безконтактні з'єднання при межових умовах I і III роду з теплоприпливами через бічні поверхні, розглядаються задачі

xv 915  
ІНСТИТУТ ХОЛОДА  
ОНАХТ

для нестационарного і стаціонарного режимів з неединичними безперервно діючими джерелами тепла. На мал.11 наведено схеми вказаних з'єднань. Для прикладу сформуємо задачу для контактної з'єднання. Маємо два порожнистих циліндри із зовнішнім діаметром, товщиною, довжиною і коефіцієнтами теплопровідності відповідно  $d_{1,2}, \delta_{1,2}, R_{1,2}$  і  $\lambda_{1,2}$ , торці яких приведені в зіткнення з постійною напруженістю в місці контакту. Початкові температури тіл  $T_0$  однакові і рівні температурі навколишнього середовища  $T_0$ . У початковий момент часу  $\tau_0$  вільний кінець першого циліндра  $x=-R_1$  приймає температуру  $T_c \ll T_0$ , яка підтримується постійною протягом всього процесу охолодження. На вільному кінці другого циліндра  $x=R_2$  має місце теплообмін згідно із законом Ньютона (або підтримується постійна початкова температура  $T_0$ ). Теплообмін через бічні зовнішні і внутрішні поверхні обох тіл відбувається згідно із законом Фур'є і враховується відповідно чотирма безперервно діючими джерелами тепла  $W_{вн1}, W_{вн2}, W_{вн3}, W_{вн4}$ . З обліком  $R_{1,2} \gg \delta_{1,2}$ , а  $\lambda_{1,2} \gg \lambda_{вн1}, \lambda_{вн2}, \lambda_{вн3}$  отримуємо одномірну задачу теплопровідності контактної з'єднання двох порожнистих циліндрів. При постійності теплофізичних характеристик матеріалу тіл і ізоляції маємо наступну систему двох рівнянь, що характеризують одномірну задачу нестационарної теплопровідності:

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{W_{вн1} - W_{вн3}}{c_1 \rho_1}, (\tau > 0, -R_1 \leq x \leq 0), \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{W_{вн2} - W_{вн4}}{c_2 \rho_2}, (\tau > 0, 0 \leq x \leq R_2), \quad (26)$$

при початкових і межових умовах:

$$T_1(x, 0) = T_0, \quad T_1(-R_1, \tau) = T_c, \quad T_1(0, \tau) = T_2(0, \tau), \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2(0, \tau)}{\partial x},$$

і теплообміні на тепловому кінці при межових умовах I) III) роду

$$T_2(R_2, \tau) = T_0, \quad \frac{\partial \theta_2(R_2, \tau)}{\partial x} = \frac{\alpha}{\lambda_2} [T_0 - T_2(R_2, \tau)] \quad \text{де } W_{вн1} = \frac{\lambda_{вн1}}{\delta_{вн1} \delta_1} [T_1(x, \tau) - T_0], \quad W_{вн3} = -\frac{\lambda_{вн3}}{\delta_{вн3} \delta_1} [T_1 - T_1(x, \tau)],$$

$$W_{вн2} = -\frac{\lambda_{вн2}}{\delta_{вн2} \delta_2} [T_2(x, \tau) - T_0], \quad W_{вн4} = -\frac{\lambda_{вн4}}{\delta_{вн4} \delta_2} [T_0 - T_2(x, \tau)], \quad \frac{\lambda_{вн1}}{c_1 \rho_1 \delta_{вн1} \delta_1} = m_{1в}, \quad \frac{\lambda_{вн3}}{\delta_{вн3} \delta_1 c_1 \rho_1} = m_{1б}, \quad m_1 = m_{1в} + m_{1б},$$

$$\frac{\lambda_{вн2}}{c_2 \rho_2 \delta_{вн2} \delta_2} = m_{2в}, \quad \frac{\lambda_{вн4}}{c_2 \rho_2 \delta_{вн4} \delta_2} = m_{2б}, \quad m_2 = m_{2в} + m_{2б}$$

Аналогічним станом формулюється задача нестационарної теплопровідності для одиничного тіла, тільки замість системи отримуємо одне рівняння. Для безконтактного (штикового) з'єднання задача стаціонарної теплопровідності формулюється так:

$$\frac{d^2 T_1}{dx^2} = \frac{W_{г1} - W_1}{\lambda}, \quad (27)$$

$$\frac{d^2 T_2}{dx^2} = \frac{W_2 - W_{г2}}{\lambda}, \quad (28)$$

ВЕСЛОД ТУРІЗМІ  
ТРАНО

Межові умови:  $T_1(R) = T_2(R) = T_c = \text{const}$ ,  $T_1(0) = T_2(0) = T_0 = \text{const}$  (I, -),  $-\lambda_1 \frac{dT_1(0)}{dx} = \alpha_1^* [T_0 - T_1(0)]$  (III),

$$-\lambda_1 \frac{dT_2(0)}{dx} = \alpha_2^* [T_0 - T_2(0)], \quad \text{де } W_1 = -\frac{\lambda_1}{\delta_1} (T_0 - T_1), \quad W_{г1} = -\frac{\lambda_{г1}}{\delta_{г1}} (T_1 - T_2), \quad W_2 = -\frac{\lambda_2}{\delta_2} (T_2 - T_c).$$

Для прикладу нижче приведені рішення для одиничного тіла та штикового з'єднання.

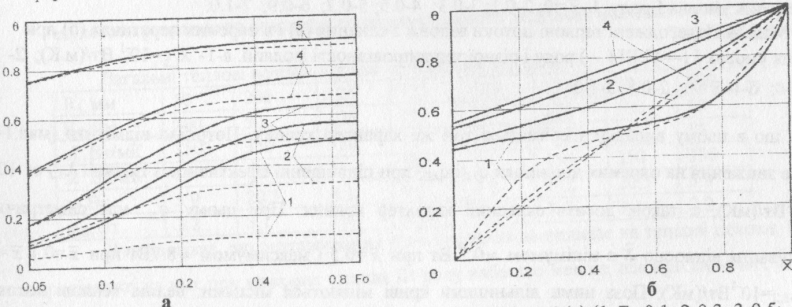
$$\theta_{III} = \frac{m_2}{m} \left( 1 + Bi \frac{\text{sh} \sqrt{\frac{m}{a}} x}{\sqrt{\frac{m}{a}} \cdot R} \right) + \frac{\sqrt{\frac{m}{a}} R \frac{m_1}{m} - Bi \frac{m_2}{m} \text{sh} \sqrt{\frac{m}{a}} R \left( Bi \cdot \text{sh} \sqrt{\frac{m}{a}} x + \sqrt{\frac{m}{a}} R \cdot \text{ch} \sqrt{\frac{m}{a}} x \right)}{\sqrt{\frac{m}{a}} R \left( Bi \cdot \text{sh} \sqrt{\frac{m}{a}} R + \sqrt{\frac{m}{a}} R \cdot \text{ch} \sqrt{\frac{m}{a}} R \right)} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2} \cdot \frac{\left[ \mu_n \left( \mu_n^2 + \frac{m_2}{a} R^2 \cdot \sin \mu_n \right) \right] \left( Bi \cdot \sin \mu_n \frac{x}{R} + \mu_n \cdot \cos \mu_n \frac{x}{R} \right)}{\left( \mu_n^2 + m R^2 / a \right) \mu_n \cdot \sin \mu_n - (Bi + 1) \cos \mu_n} \cdot \exp \left[ - \left( \mu_n^2 + m a / R^2 \right) Fo \right], \quad (29)$$

$$T_1 = (k + 1 - \gamma) \cdot (C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x}) + (k + 1 - \beta) \cdot (C_3 e^{\beta x} + C_4 e^{-\beta x}) + p(k + 1) - k T_c, \quad (30)$$

$$T_2 = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x} + C_3 e^{\beta x} + C_4 e^{-\beta x} + p, \quad (31)$$

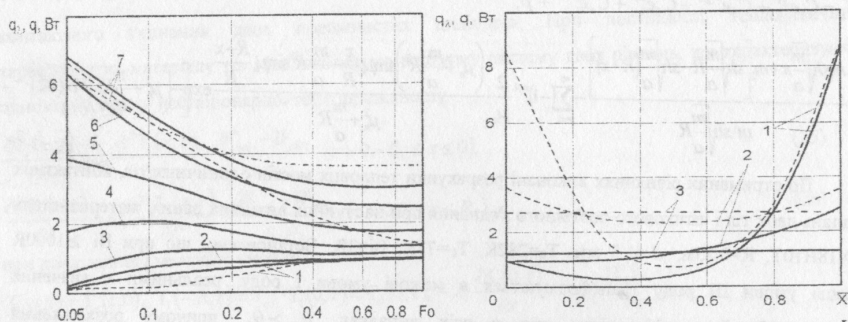
$$\theta = \frac{m \text{sh} \sqrt{\frac{m}{a}} x + m_2 \left[ \text{sh} \sqrt{\frac{m}{a}} R - \text{sh} \sqrt{\frac{m}{a}} (R - x) \right]}{m \text{sh} \sqrt{\frac{m}{a}} R} - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{2}{\mu_n} \cdot \frac{\left( \mu_n^2 + \frac{m_2}{a} R^2 \right) \sin \mu_n \frac{x}{R} + \frac{m_2}{a} R^2 \sin \mu_n \frac{R-x}{R}}{\mu_n^2 + \frac{m}{a} R^2} \exp \left[ - \left( \mu_n^2 + \frac{m}{a} R^2 \right) Fo \right] \quad (32)$$

По отриманих рівняннях виконані розрахунки теплових мостів одиничних тіл, контактних з'єднань двох тіл і штикового роз'ємного з'єднання при наступних вихідних даних: матеріал-сталь 12X18H10T,  $R=0.25$ м,  $\delta=1.5$  мм,  $T_0=282$ К,  $T_c=77$ К,  $Bi=3R$ . Встановлено, що при  $Bi \geq 1000R$  межові умови III роду трансформуються в межові умови I роду, реальними є значення  $Bi=(0.1...10)R$ . З мал.12 слідує, що у всіх випадках,  $\theta_{III} > \theta_I$ , причому розходження  $\theta_{III} - \theta_I$  зростають як по мірі зниження  $\bar{x}$ , так і по мірі зростання  $Fo$ .



Мал.12. Вплив теплопровідності ізоляції на нестационарний (а) ( $1-\bar{x}=0.1; 2-0.3; 3-0.5; 4-0.7; 5-0.9$ ) і стаціонарний (б) ( $1-\lambda_{1,2}=10^{-1}$  Вт/(м К),  $2-10^{-2}; 3-10^{-3}; 4-10^{-4}$ ) безрозмірний температурний параметр при межових умовах I (---) і III (-) роду.

При ідеальній ізоляції ( $\lambda_{1,2}=0$ ) розподіл температур являє собою прямі лінії з різним діапазоном змін: від 0 до 1 для межових умов I роду і від 0.56 до 1 для межових умов III роду. Причому ці значення практично зберігаються зі значеннями  $\theta$  при  $\lambda_{1,2}=10^4$ Вт/(мК), тобто немає необхідності прагнути  $\lambda_{1,2}<10^4$ Вт/(мК). З зростанням  $\lambda_{1,2}$  від 0 до  $10^3$ Вт/(мК) розходження з прямими лініями  $\theta_i$  і  $\theta_{III}$  не істотні. Але вже при  $\lambda_{1,2}=10^2$ Вт/(мК) і особливо при  $\lambda_{1,2}=10^1$ Вт/(мК) вони стрімко зростають. Вплив теплопровідності ізоляції на теплові потоки приведені на мал.13,14. Тенденція зростання нестационарних теплових потоків  $q_x$  (при  $\lambda_{1,2} \neq 0$ ) згодом у перетинах  $\bar{x} \geq 0$  зберігається аж до 0.3. При  $\bar{x} \geq 0.5$  з'являються помітні перегини у кривих при  $Fo \approx 0.1$  і тенденція стає протилежною, тобто відбувається зменшення  $q_x$ , яке зберігається аж до  $\bar{x}=1$  включно. Крім даних при  $\lambda_{1,2}=10^2$ Вт/(мК) приводяться також значення  $q$  (при  $\lambda_{1,2}=0$ ) для перетинів  $\bar{x}=0$  і  $\bar{x}=1$ .

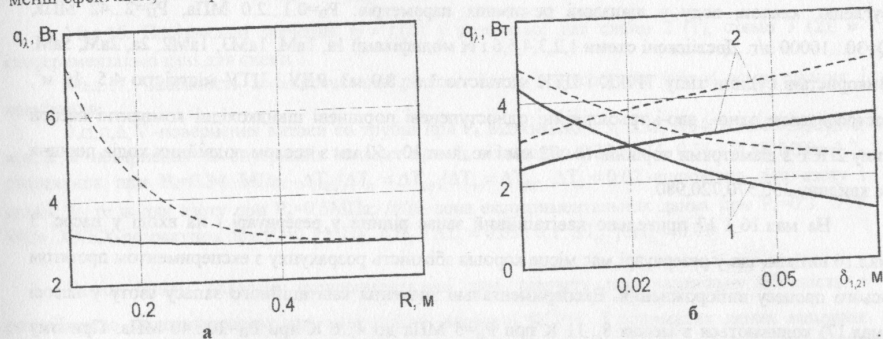


Мал.13. Несталі теплові потоки в різних перетинах теплового мосту при межових умовах I і III роду —1- $\lambda_{1,2}=10^2$  Вт/(м К), ---- $\lambda_{1,2}=0$ -при межових умовах III роду; - · - · - $\lambda_{1,2}=10^2$  Вт/(м К) при межових умовах I роду. 1- $\bar{x}=0$ ; 2-0.1; 3-0.3; 4-0.5; 5-0.7; 6-0.9; 7-1.0.

Мал.14. Налагоджені теплові потоки вздовж з'єднання (а) і в окремих перетинах (б) при межових умовах I (---) і III (—) роду і різній теплопровідності ізоляції. а-1- $\lambda_{1,2}=10^1$  Вт/(м К); 2- $10^2$ ; 3-0; б-1- $\bar{x}=0$ ; 2-0.5; 3-1.0.

Видно, що в цьому випадку зберігається той же характер кривих. Потрібно відмітити (мал.14) помітне зниження на окремих ділянках  $q_{x1}$  і  $q_{xIII}$  при підвищенні ефективності ізоляції  $\lambda_{1,2}$  от  $10^1$  до  $10^2$ Вт/(мК), а також досить складний характер кривих. При цьому  $q_{x1}$  має симетричне розташування відносно  $\bar{x}$  з мінімумом  $\approx 0.7$  Вт при  $\bar{x}=0.5$  і максимумом  $\approx 8.7$ Вт при  $\bar{x}=0$  і  $\bar{x}=1$  (при  $\lambda_{1,2}=10^1$ Вт/(мК). Поза цими ділянками криві міняються місцями: великі теплові потоки мають місце при більшій ефективності ізоляції, що може бути пояснено тим, що стоки тепла переважають над теплоприпливами. Для межових умов III роду розташування кривих несиметричне з максимумом  $\approx 8.6$ Вт при  $\bar{x}=1$  і мінімумом  $\approx 0.45$ Вт при  $\bar{x}=0.3$  (при  $\lambda_{1,2}=10^1$ Вт/(м

К). Значення  $q_{x1}$  і  $q_{xIII}$  в діапазоні  $\bar{x}=0.5 \dots 1$  практично співпадають, при  $\bar{x}=0 \dots 0.5$   $q_{xIII} \ll q_{x1}$ . Все, що сказане вище, відноситься також до даних при  $\lambda_{1,2}=10^2$ Вт/(м К), однак розходження між  $q_{x1}$  і  $q_{xIII}$  в цьому випадку істотно менші. При ідеальній ізоляції теплові потоки в обох випадках зберігають постійні значення і становлять 2.74 і 1.17Вт відповідно для  $q_{x1}$  і  $q_{xIII}$ . Теплові потоки  $q_x$  і  $q$  для межових умов III роду у всіх випадках, що порівнюються, менше, ніж для межових умов I роду. З мал.15 визначається, що збільшення довжини від 0.1 до 0.6м приводить до значних знижень теплоприпливів при межових умовах I роду і є неістотним при межових умовах III роду, що свідчить про доцільність збільшення довжини в першому випадку і недоцільності-у другому. При межових умовах III роду збільшення товщини  $\delta_1$  більш ефективне, а зменшення товщини  $\delta_2$  менш ефективне, ніж при межових умовах I роду.



Мал.15. Вплив довжини теплового мосту  $R$  (а) і товщини ізоляції  $\delta_{1,2}$  (б) на налагоджені теплові потоки на холодному кінці при  $\lambda_{1,2}=10^2$  Вт/(м К) і межових умовах I (---) і III (—) роду. 1- $q_x = f_1(\delta_1)$ ; 2- $q_x = f_2(\delta_2)$ .

Результати розрахунків контактної мідно-сталевого з'єднання наведені в табл. 2. Таблиця 2.

Загальні теплові потоки вздовж контактних з'єднань								
$R_1$ , мм	50	200	125	125	125	125	50	200
$R_2$ , мм	200	50	125	125	125	125	200	50
$\lambda$ , Вт/мК	350	350	350	15	15	350	15	15
$\lambda$ , Вт/мК	15	15	15	350	15	350	350	350
$q_c$ , Вт	5.9	20.5	9.2	9.2	4.8	112	20.5	5.9
$q_{III}$ , Вт	2.2	3.1	2.6	2.6	2.1	3.5	3.1	2.2

З неї витікає, що розташування тіл в з'єднанні не впливає на теплові потоки, і вплив теплопровідності на них при межових умовах III роду набагато менше, ніж при межових умовах I роду.

Таким чином, розроблені математичні моделі теплових мостів різного класу з'єднань, визначено вплив найважливіших параметрів: критерію Біо, теплопровідності ізоляції, довжини

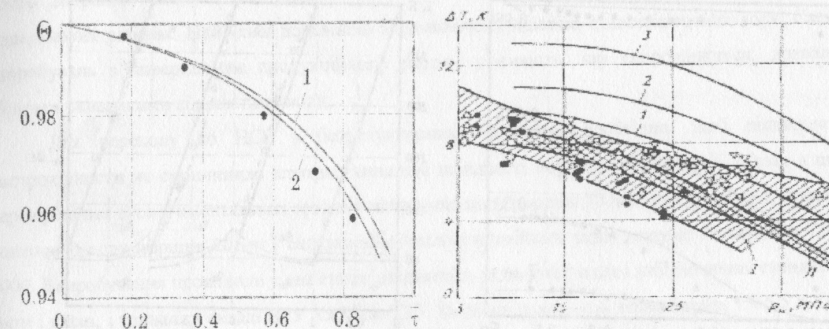
тіла і його розташування, товщини ізоляції. Встановлено, що застосування з'єднань при межових умовах III роду призводить до менших втрат тепла, ніж при межових умовах I роду. Розроблені моделі є важливим інструментом при проектуванні теплових мостів КСРН.

П'ятий розділ присвячено експериментальним дослідженням КСРН: схем і теплових мостів, випробуванням НСГ на перспективних моделюючих рідинах і розробці насосів з безредукторним приводом. Достовірність розроблених математичних моделей схем КСРН і теплових мостів підтверджена випробуваннями на промислових стендах серійної продукції і експериментальними дослідженнями на спеціально розроблених лабораторних стендах, що оснащені контрольно-вимірною апаратурою класу 0,4, 1,0 і 1,5. Це забезпечувало високу точність вимірювань тиску, температур і витрат. Як робочі середовища використали кисень, азот, аргон, двоокис вуглецю, хладон, воду у діапазоні режимних параметрів:  $P_B=0.1\text{...}2.0$  МПа,  $P_H=2\text{...}42$  МПа,  $Q=30\text{...}10000$  л/г. Досліджені схеми 1, 2, 3, 4, 5, 6 і їх модифікації 1а, 1аМ, 1аМЗ, 1аМ2, 2а, 2аМ, 5аМ. Використані судини типу ТРЖК і ЦТК місткістю 1.6...8.0 м<sup>3</sup>, РДУ і ЦТУ місткістю 4.5...10 м<sup>3</sup>, застосовували одно-, дво- і трьохлінійні одноступеневі поршневі швидкохідні компактні насоси типу 2НСГ з діаметрами поршнів 10...72 мм і ходами 10...50 мм з числом подвійних ходів поршня за хвилину 350, 570, 720, 980.

На мал. 16 і 17 приведено кавітаційний запас рідини у резервуарі і на вході у насос. З мал. 16 витікає, що у резервуарі має місце хороша збіжність розрахунку з експериментом протягом всього процесу випорожнення. Експериментальні значення кавітаційного запасу азоту у насосі (мал. 17) коливаються в межах 8...11 К при  $P_H=5$  МПа до 4...6 К при  $P_H=30\text{...}40$  МПа. Причому  $\Delta T_B=6$  К отримано при  $P_H=40$  МПа і  $P_B=0.38$  МПа. Для порівняння нарівні із зоною експериментальних значень приведені розрахункові дані, отримані для діапазону температурних втрат у трубопроводі 0.05...0.1 від первинного охолодження  $\Delta T_0$ . Із цього порівняння випливає, що в більшості експериментів ці втрати менше вказаних величин.

Розрахункові дані при реальних теплоприпливах для кисню (крива 2), що отримані при  $P_B=0.34$  МПа, свідчать про широкі можливості схеми, а порівняння по азоту (крива 1) - про добру збіжність з експериментом. Потрібно зазначити, що повернення витoku по просвердленням у циліндрі менш переважне. Підвищення тиску всмоктування до 0.5 МПа (крива 3) дозволяє підвищити тиск нагнітання до  $P_H > 40$  МПа.

Експериментальні дослідження п'яти альтернативних схем КСРН на рідкому двоокису вуглецю показали, що найбільш прийнятною є схема з поверненням усього витoku у насос, як більш проста при реалізації і ефективна при експлуатації. Вона може бути з успіхом застосована майже при роботі по «кільцю», тобто з поверненням перекачуваного рідкого двоокису вуглецю у резервуар, що завжди необхідно при запуску. Ця схема реалізована в установках, що випускаються серійно.



Мал. 16. Порівняльні значення  $\Theta = f(\bar{\tau})$  у резервуарі для схеми 2 (1), схеми 3 (2), ● - експериментальні дані для схеми 3.

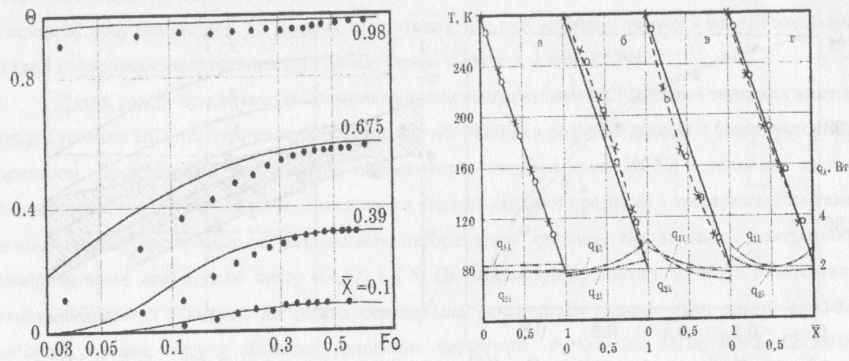
Мал. 17. Залежність охолодження рідкого азоту в насосі від тиску всмоктування і нагнітання.

◇, □, ○, △, ▽ - повернення витoku по трубці при  $P_B$  відповідно 0.3, 0.32, 0.34, 0.36 і 0.38 МПа; ■, ●, ▲, ▽ - повернення по внутрішніх каналах при  $P_B$  відповідно 0.32, 0.34, 0.36 і 0.38 МПа; 1, 2 - розрахунок при  $P_B=0.34$  МПа,  $\Delta T_B/\Delta T_0 = \Delta T_{TP}/\Delta T_0 = \Delta T_{HC}/\Delta T_0 = 0.02$  - відповідно для азоту і кисня; 3 - те ж для азоту при  $P_B=0.5$  МПа; // - зона експериментальних даних при  $P_B=0.3\text{...}0.38$  МПа; XXXX - розрахунок при  $P_B=0.3$  МПа,  $\Delta T_{TP}/\Delta T_0 = 0.05\text{...}0.1$ ,  $\Delta T_{HC}/\Delta T_0 = 0.01$ .

Таким чином наведені експериментальні дані свідчать про задовільну збіжність з розробленою моделлю розрахунку кавітаційної міцності КСРН. З отриманих даних випливає також, що запропоновані залежності добре описують реальні втрати.

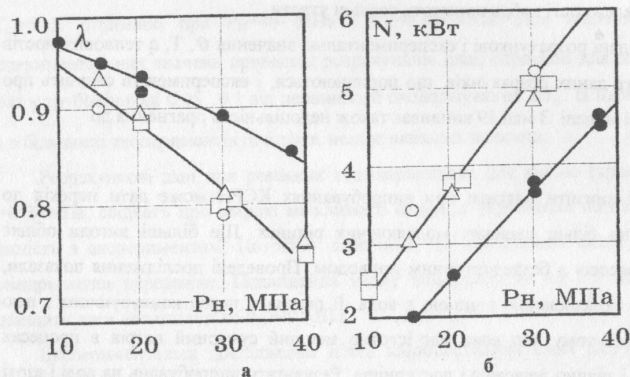
На мал. 18, 19 приведені розрахункові і експериментальні значення  $\theta$ ,  $T$ ,  $q$  теплових мостів КСРН. Задовільна збіжність даних розрахунків, що порівнюються, і експериментів свідчить про достовірність математичної моделі. З мал. 19 випливає також недоцільність прагнення до  $\lambda_{1,2} < 10^{-4}$  Вт/мК.

Реальні можливості знизити витрати при випробуваннях КСРН може дати перехід до випробувань (без втрат) на більш дешевих моделюючих рідинах. Ще більші вигоди обіцяє застосування в їх складі насосів з безредукторним приводом. Проведені дослідження показали, що найбільш відповідною моделюючою рідиною є вода. Її переваги перед конкуруючим з нею хладоном R113 полягають в тому, що вона має істотно менший сумарний нагрів в процесах стиснення і дроселювання і значно дешевша і доступніша. Результати випробувань на воді і азоті приведені на мал. 20. З мал. 20а випливає, що значення коефіцієнтів подач для води істотно вище, ніж для азоту, що гарантує стійку роботу насоса. Енергетичні показники насосів на воді і азоті приведені на мал. 20б. Безпосередньо видно, що перехід до випробувань на воді призводить до



Мал.18 Зміна температурного параметра у різних перетинах теплового моста у режимі захолажування при межових умовах I роду.  $\lambda_1 = 9.6 \cdot 10^{-3}$  Вт/(мК),  $\lambda_2 = 0$ , криві-розрахунок, о-експеримент.

Мал.19. Розподіл температур і теплових потоків вздовж елементів штикового роз'ємного з'єднання. Суцільні криві  $T_1$  і  $T_2$ , по рівняннях (30) і (31),  $\lambda_{1,2} = 1 \cdot 10^{-4}$  Вт/(м К); штрихові-середнє значення  $T_1(x) \dots T_2(x)$ ; а- $\lambda_{1,2} = 1 \cdot 10^{-4}$ ; б- $\lambda_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ ,  $\lambda_2 = 1 \cdot 10^{-4}$ ; в- $\lambda_1 = 1 \cdot 10^{-4}$ ,  $\lambda_2 = 1 \cdot 10^{-2}$ ; г- $\lambda_{1,2} = 1 \cdot 10^{-2}$ ; о- $T_1$ , х- $T_2$  штрихпунктирні криві- $q_{\lambda 1}$  і  $q_{\lambda 2}$ -розрахунок; о- $T_1$ , х- $T_2$  (експеримент).

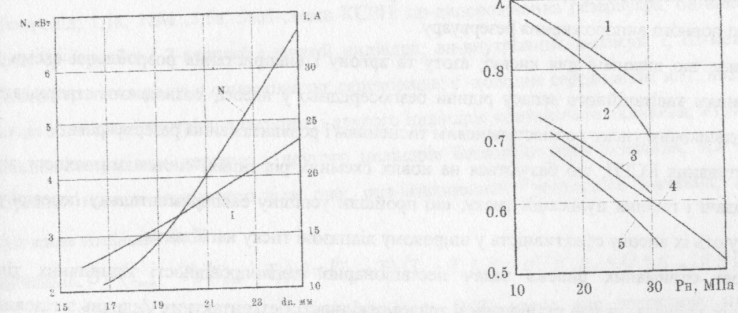


Мал.20. Порівняльні значення коефіцієнта подачі  $\lambda$  (а) і споживаної потужності N(б) при різному тиску нагнітання  $P_n$  насоса при випробуваннях на воді (●) і азоті (Δ, □, ○).

економії споживаної насосом потужності приблизно на 20...25%. Таким чином, випробування насосів для криогенних і низькотемпературних рідин в тих випадках, коли повинна визначитися

якість збирання насосів, що серійно випускаються, можуть бути успішно проведені на моделюючих рідинах. Найбільш доцільною моделюючою рідиною є дистильована вода. Схема випробувань з поверненням продукційного потоку у емкість, що спорожняється, дозволяє обійтися невеликими кількостями води.

Для переходу до НСГ з безредукторним приводом необхідно, щоб підвищення бистрохідності не спричинило істотно завищені швидкості поршня і клапанів. У зв'язку з цим перевірені два експериментальних зразки з довжиною ходу поршня 30 мм і два дослідних зразки з довжиною ходу поршня 20 мм і синхронним числом подвійних ходів поршня за хвилину 750 і 1000. Випробування проводили у два етапи: заздалегідь на промислових і лабораторних стендах на азоті і кисні, і тривалі у складі ВРУ КЖКАЖ-0.25. Загальна тривалість випробувань 1566.5 г. При цьому випробувані різні варіанти з'єднувальної муфти, противаг, клапанів і підшипникового вузла шатуна крейцкопфа, а також механізму регулювання ходу всмоктуючого клапана при працюючому НСГ. На мал. 21,22 приведені результати експериментів.



Мал.21. Залежність споживаної потужності (N) і струму приводу (I) від діаметра поршневого ущільнення при  $P_n=22$  МПа,  $n_c=1000$  об/хв,  $S_{II}=17.5$  мм

Мал.22. Порівняльні значення коефіцієнтів подачі дослідних зразків (1,4,5) і серійних насосів при різному тиску нагнітання. 1- $d_{II}=20$  мм,  $n_c=1000$  об/хв,  $S_{II}=17.5$  мм; 2- $d_{II}=25$  мм,  $n_c=1500$  об/хв,  $S_{II}=15$  мм; 3- $d_{II}=20$  мм,  $n_c=750$  об/хв,  $S_{II}=17.5$  мм; 4- $d_{II}=16$  мм,  $n_c=1000$  об/хв,  $S_{II}=17.5$  мм; 5- $d_{II}=16$  мм,  $n_c=750$  об/хв,  $S_{II}=20$  мм.

У ході випробувань визначені оптимальні значення ходу клапанів, а також необхідність в посиленні підшипникового вузла шатуна крейцкопфа. Установлено, що швидкохідність 750 двійних ходів поршня за хвилину може бути з успіхом застосована у насосах, що випускаються. Перспективним напрямком досліджень є насоси з більш підвищеною швидкохідністю з безредукторним приводом безшатуного типу.

У цей час дослідний зразок 2НСГ-0.063/20-2 експлуатується в АТ «Кислородмаш».

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз існуючих КСРН високого тиску свідчить про те, що створення ефективних систем забезпечення споживачів кріогенними рідинами та газами повинно вирішуватися шляхом розробки нових схемних рішень.
2. Запропоновано варіанти схемних рішень для використання при різних умовах експлуатації, що отримані за різною компоновкою обладнання і циркуляції витоку, що протікає через поршневі ущільнення насосу. Важливим елементом при цьому є використання розподілу теплового навантаження у резервуарі та насосі і дозування парової фази витоку.
3. На базі розробленого системного класифікатора, створених моделей планування показників призначення та одержаних на основі теплових балансів у резервуарі і насосі математичних моделей створена нова гама схемних рішень КСРН з високою кавітаційною стійкістю, мінімальними витратами рідини, високими коефіцієнтами подачі і можливістю безперервної роботи до повного випорожнення резервуару.
4. Розрахунки, що виконані для кисню, азоту та аргону і використання розробленої схеми з формуванням кавітаційного запасу рідини безпосередньо у насосі, дозволяють створювати КСРН надвисокого тиску з одноступеневим тисненням і розвантаженим резервуаром.
5. Комплектування КСРН, що базуються на нових схемних рішеннях, системами захисту від зриву подачі і гасіння пульсацій тиску, що пройшли успішну експериментальну перевірку, забезпечують їх високу ефективність у широкому діапазоні тиску нагнітання.
6. На основі отриманих рішень задач нестационарної теплопровідності одиничних тіл, контактних з'єднань, задачі стаціонарної теплопровідності безконтактних з'єднань з газовим прошарком між ними з неединичними безперервно діючими джерелами тепла при межових умовах I і III роду розроблена узагальнена теорія теплових мостів КСРН і встановлено вплив теплопровідності ізоляції, теплопровідності матеріалу тіл, критерію Біо, а також геометричних параметрів з'єднань на температурні розподіли і теплові потоки.
7. Експериментально встановлено достовірність створених математичних моделей схем і теплових мостів і визначена доцільність проведення випробувань насосів, що випускаються серійно, на моделюючій рідині і використання насосів підвищеної швидкохідності з безредукторним приводом.
8. Експериментальні дані, практичні розробки і математичні моделі, що наведені в роботі, дозволяють теоретично узагальнити і вирішити актуальну проблему створення наукових основ ефективних і надійних систем забезпечення кріогенними рідинами та газами.

## УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

Символи: R, d,  $\delta$ , x-довжина, діаметр, товщина, координата, м; S-хід поршня, мм; F-площа, м<sup>2</sup>;  $\tau$ - $\tau_{ce}$ , г, с; T температура, К;  $\lambda$ ,  $\eta$ -коефіцієнти подачі (теплопровідність, Вт/(м·К) і наповнення насосу; W-питома теплоприпливи, Вт/м<sup>3</sup>;  $c'_p$ -ізобарна теплоємність рідини, кДж/(кг·К);  $\rho$ -щільність, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$ -температуропровідність, м<sup>2</sup>/с; g-теплота випаровування, кДж/кг;  $\alpha$ -коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К); Q, g -подача насоса, масовий потік, кг/г; G -маса рідини, кг;  $\Theta$  - безрозмірний кавітаційний запас рідини;  $\theta$  - безрозмірний температурний параметр теплового моста; q-тепловий потік, Вт; P- тиск, МПа; V- об'єм, м<sup>3</sup>; N -потужність приводу, кВт; n -число оборотів приводу, об/хв, число подвійних ходів поршня за хвилину; I -сила току, а;  $\Delta Q_p$  - безрозмірні втрати рідини; B-безрозмірний параметр, що характеризує підвищення температури рідини в резервуарі від перемішування з витоком; K<sub>нс</sub>, K<sub>p</sub> -темп нагріву рідини відповідно в насосі і резервуарі. Індекси: (')-рідина, (')-пар; 0-початкове значення; в-всмоктування, вх-вхід; н-нагнітання; p-резервуар; нс-насос; п-поршень; с-синхронне, дв-двигун; ут-витік; ут.в, ут.н-витік у верхню і нижню частини резервуара; ут.нс, ут.р-витік в насос і резервуар; кип-кипіння; тр-трубопровід; 1,1a, 1aM...5,5a, 5aM-схеми КСРН; ор-випорожнення резервуара; он-випорожнення насоса; ср-середнє; 1,2-перший і другий циліндри; вн-внутрішній; к-кожух; I, III-межові умови першого і третього роду; о.с-навколишнє середовище; с-холодне середовище; ин1, ин2, ив1, ив2 -ізоляція зовнішня і внутрішня першого і другого циліндрів контактного з'єднання; и1, и2- ізоляція зовнішня і внутрішня першого і другого циліндрів безконтактного з'єднання; 1,2 -зовнішня і внутрішня ізоляція одиночного тіла; max, min-максимальні і мінімальні значення;  $\lambda, \alpha, R, \varepsilon, \mu$ -позначення коефіцієнтів К.

Комплекси:  $\Theta = (T_{кин} - T) / (T_{кин} - T_0)$ ;  $\theta = (T_0 - T) / (T_0 - T_c)$ ;  $\bar{\rho} = \rho'' / \rho'$ ;  $g_B = Q + g_{ym}$ ;  $g = Q + g''_{ym}$ .

Скорочення: КСРН -кріосистеми резервуар-насос; НСГ -насос для зріджених газів; ТРЖК-транспортний резервуар для рідкого кисня; ЦТК-цистерна транспортна кріогенна; РДУ-резервуар для рідкого двоокису вуглецю; ЦТУ-цистерна транспортна вуглекислотна; ВРУ-повітряно розділювальна установка; ГСГ-газифікатор для зріджених газів.

Основний зміст дисертації опубліковано в роботах:

1. В. Blyukher, С. Borzileri, Y. Brailovsky and A. Tsykalo. Pressure Vessels and Piping Systems: General Requirements and Documentation for Testing, Operations, Applications, and Components, PVP-Vol.395, The American Society of Mechanical Engineers, United Engineering Center, New York, N.Y., 1999, pp. 221-228.
2. Брайлівський Я.Л., Корольов А.В. Особливості експлуатації насосів високого тиску для зріджених газів // Холодильна техніка і технологія. -2000 -№68.-С. 26-31.

3. Брайлівський Я.Л., Цикало А.Л. Ефективна схема газифікації криогенної рідини // Хімічне і нафтове машинобудівництво.-1994 -№10.-С. 20-25.
4. Брайлівський Я.Л., Цикало А.Л. Дослідження насосних криогазификаторів з необмеженою тривалістю безперервної роботи // Хімічне і нафтове машинобудівництво.-1994 -№7.-С. 15-17.
5. Брайлівський Я.Л. Дослідження криосистем промислових об'єктів // Вісник міжнародної академії холода.-1999 -Вип.4.- С. 16-19.
6. Брайлівський Я.Л. Математичне моделювання насосних криосистем високого тиску // Холодильна техніка і технологія.-1999 -№61.-С. 7-11.
7. Брайлівський Я.Л. Зниження енерговитрат в насосних криосистемах високого тиску // Вісник Державного університету «Львівська політехніка» «Проблеми економії енергії» Львів-1999 - №2.-С. 65-69.
8. Брайлівський Я.Л. Нові схеми криосистеми резервуар-насос // Холодильна техніка і технологія.-2000 -№67.-С. 52-56.
9. Брайлівський Я.Л. Дослідження систем зберігання, транспортування і газифікації криогенних рідин // Хімічне і нафтове машинобудівництво.-1999 -№7.-С. 21-24.
10. Брайлівський Я.Л. Ефективність насосних криосистем високого тиску // Холодильна техніка і технологія.-2000-№65.-С.-83-86.
11. Брайлівський Я.Л. Вдосконалення насосних криосистем високого тиску // Холодильна техніка і технологія.-1999 -№64.-С. 26-33.
12. Брайлівський Я.Л. Перспективи створення насосних криосистем надвисокого тиску // Холодильна техніка і технологія.-1999 -№60.-С. 7-10.
13. Брайлівський Я.Л., Блюхер Б.Г. Дослідження теплопровідності теплових мостів криогенних трубопроводів // Хімічне і нафтове машинобудівництво.-1997 -№2.-С. 32-34.
14. Брайлівський Я.Л. До питання про теорію теплових мостів криогенних систем // Хімічне і нафтове машинобудівництво.-1998 -№8.-С. 19-23.
15. Большаков Ю.В., Брайлівський Я.Л., Позвонков Ф.М. Зміна температури вздовж циліндричного теплового моста криогенних трубопроводів// ІФЖ-1974 -Т. 26, №6.-С. 1062-1066.
16. Брайлівський Я.Л. Теплопровідність контактних з'єднань криогенних систем // Холодильна техніка і технологія.-1999 -№63. С. 21-27.
17. Брайлівський Я.Л. Теплові мости криогенних систем. Особливості конструкції і розрахунку // Холодильний бізнес.-1999 -№5.-С. 34-35.
18. Брайлівський Я.Л. Теплообмін в контактних з'єднаннях криогенних систем. // Хімічне і нафтогазове машинобудівництво.-1999 -№12.-С. 14-18.

19. Позвонков Ф.М., Большаков Ю.В., Брайлівський Я.Л., Сальников І.Е. Дослідження температурного поля теплових мостів криогенних систем // РКТ.-Москва.-1973 -№2.-С. 21-24. (ДСП).
20. Брайлівський Я.Л. Рішення однієї задачі теплопровідності теплових мостів криогенних систем // Холодильна техніка і технологія.-1999 -№62.-С. 146-152.
21. Брайлівський Я.Л. Теплопровідність контактних з'єднань низькотемпературних систем //Зб. праць «Вісник Вінницького політехнічного інституту».-2000.-№4.-С. 61-65.
22. Брайлівський Я.Л. Задачі нестационарної теплопровідності контактних з'єднань з неединичними безперервно діючими джерелами тепла при низьких температурах // Зб. наук. пр. «Вісник Харківського політехнічного університету».- 2000.-Вип. 111.- С. 58-66.
23. Большаков Ю.В., Брайлівський Я.Л., Позвонков Ф.М., Сальников І.Е., Філін Н.В. Дослідження теплообміну в роз'ємному з'єднанні криогенних трубопроводів// ІФЖ.-1974 -Т. 27.-№6.- С. 134-137.
24. Брайлівський Я.Л. Про практичну реалізацію схемних рішень криосистем // Наук.-техн. зб. Харківської державної академії міського господарства.-2000. Серія: Технічні науки.-Вип.25.-С. 174-178.
25. Брайлівський Я.Л., Павленко Ю.А. Перспективні напрями вдосконалення поршневіх насосів високого тиску для зріджених газів // Холодильна техніка і технологія.-2000 -№66.-С. 31-35.
26. Брайлівський Я.Л. Випробування насосів для зріджених газів на моделюючих рідинах // Зб. пр. УкрНДІгаз «Питання розвитку газової промисловості України».-Харків.-1999 -Вип. XXVIII.-С. 115-120.
27. Брайлівський Я.Л. Насоси високого тиску для криогенних рідин. Проблеми і перспективи. // Хімічне і нафтогазове машинобудівництво.-2000 -№2.-С. 16-19.
28. А.с. 1756731 СРСР, МКИ F 17 3 5/02, 7/00. Установа для відкачування рідкого криопродукта / Брайлівський Я.Л., Цикало А.Л.(СРСР).-№4853616/26; Заявлене 20.07.90; Опубл. 23.08.92, Бюл. №31.
29. А.с. 1779780 СРСР, МКИ F 04 В 49/10. Система захисту поршневого насоса // Корольов В.А., Брайлівський Я.Л., Браун В.М. (СССР).-№4880928/29; Заявлене 28.06.90; Опубл. 07.12.92, Бюл. №45.
30. А.с. 1622706 СРСР, МКИ F 16 L 55/02, 55/04. Гаситель пульсацій тиску // Брайлівський Я.Л., Корольов А.В., Севергинов В.В., Браун В.М. (СССР).-№4645466/29; Заявлене 01.02.89; Опубл. 23.01.91, Бюл. №3.
31. А.с. 1656279 СРСР, МКИ F 16 55/05. Демпфер // Корольов А.В., Яворський В.І., Брайлівський Я.Л. (СССР).-№4650821/29; Заявлене 15.02.89; Опубл. 15.06.91, Бюл. №22.

32. Браун В.М., Брайловський Я.Л., Цикало А.Л., Троценко А.В. Дослідження кріогенних поршневих насосів високого тиску з використанням математичних моделей // тез. доп. Всес. наук.-практ. конф. "Углекислотне і газифікаційне обладнання". Одеса, АТ "Кислородмаш". 1991.
33. Браун В.М., Брайловський Я.Л., Галіпан Л.І. та інш. Розробка і дослідження екологічно чистої холодильної установки для системи тривалого зберігання рідкого низькотемпературного двоокису вуглецю // тез. доп. Всес. наук.-практ. конф. "Углекислотне і газифікаційне обладнання". Одеса, АТ "Кислородмаш". 1991.
34. V.Blyukher, S.Borzileri, Y.Brailovsky, A.Tsykalo. Pressure vessels and piping systems: general requirements and documentation for testing // 1999 ASME Pressure vessels and piping (PVP) conference, Vol. 395 Operations, applications, and components, Boston, 1999, p.221-225.
35. Брайловський Я.Л. Ефективність насосних кріогенних систем високого тиску // тез. доп. міжн. конф. «Холодильна техніка-проблеми і рішення», Астрахан. держ.техн. університет.-Астрахань.-1999. -С.50-51.
36. Брайловський Я.Л. Зниження енерговитрат в насосних кріосистемах високого тиску. Збірник доповідей 2-ї міжнародної конференції «Проблеми економії енергії», Львів, Вісник Державного університету «Львівська політехніка», 1999.
37. Brailovsky Ya., Blyukher V. Thermal bridges of cryogenic systems // 10-th International Congress on Thermal Engineering and Thermogrammetry ("THERMO").-1997.- Budapest. p. 117-120.
38. Брайловський Я.Л., Троценко А.В., Цикало А.Л. Математична модель поршневого насоса високого тиску для кріогенних рідин // Тез. доп. Всес. Наук.-практ. конф. «Холод народному господарству». Л., 1991, С.163.
39. Brailovsky Ya. Efficient scheme for pumping cryogenic gasification plants // Proceedings of 4-th International Conference «Criogenics'96, Praha, 1996, p.185-187.
40. Брайловський Я.Л. Дослідження теплообмінних процесів в поршневих насосах кріогазифікаційних установок // Тез. доп. Міжн. наук.-техн. конф. «Холод і харчові виробництва». С.-Петербург, С-ПАХІПТ. 1996, С. 55.
41. Brailovsky Ya. Perfection of cryosystems of transport plants // Book of Abstracts of the International Conference of IIF / IIR «Refrigeration utilization for transportation in hot climate areas», Astrakhan, 1997, p. 11.
42. Брайловський Я.Л. Проблеми створення екологічно чистих систем зберігання, транспортування і газифікації кріогенних рідин і низькотемпературних зріджених газів // 36. наук. праць УІ наук.-метод. конф. «Людина та навколишнє середовище-проблеми безперервної екологічної освіти у вузах». - Одеса.-1999. -С. 83-84.

43. Brailovsky Ya., Tsykalo A. Investigation of perspective scheme for pumping cryogenic gasification plants // Proceedings of 19-th International Congress of Refrigeration.-The Haag.-1995 -Vol.IIIb.-p. 1064-1071.
44. Брайловський Я.Л. Дослідження газифікаційних установок високого тиску // Труды 57-ї наук.-техн. конф. ОТХП.-Одеса.-1988. -С. 15.
45. Brailovsky Ya., Tsykalo A. Investigation of perspective scheme for pumping gasification plants // Book of Abstracts of Low Temperature Engineering and Cryogenics Conference ("LTEC-94").-London.-1994 -p.143.
46. Brailovsky Ya. Cryosystems reservoir-pump. The problems and outlook. // CD-Room of Full texts 14-th International Congress of Chemical and Process Engineering «Chisa-2000», 27-31 August 2000.-Praha.-Czech Republic.- Fail PI.89.
47. Brailovsky Ya. Thermal conductivity of sectional junction for cryogenic pipelines // Seminaire «EUROTHERM №2» (Roma, Italy, 1996), Open Forum Session.
48. Brailovsky Ya. Thermal conductivity of the cryogenic systems thermal bridges // 11 th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry ("THERMO"), 17-21. June.-1999 - Budapest.- Hungary.-p.213-217.
49. Brailovsky Ya. Heat transfer in cryosystems of pumping gasificators // CD-Room of Full texts of 20-th Congress IIR/IIF «Refrigeration into the Third Millenium», 19-24. September.-1999 -Sydney.-Australia.-Fail 318.
50. Брайловський Я.Л. Ефективність теплових мостів кріогенних систем //Тез. доп. Міжн. конф. «Холодильна техніка - проблеми і рішення». - Астрахань: Астраханський державний технічний університет.-1999. -С. 48.
51. Брайловський Я.Л. Дослідження нестационарної теплопровідності роз'ємного з'єднання кріогенних трубопроводів // Тез. доп. Міжн. наук.-техн. конф. "Холод і харчові виробництва".-С.-Петербург, С-ПАХІПТ.-1996. -С. 67.
52. Брайловський Я.Л. Кріосистеми резервуар-насос. Схеми і теплові мости // Труды міжн. наук.-практ.конф. «Регіональні проблеми енергозбереження у виробництві і споживанні енергії».-Кіів.-1999. -С. 42-43.
53. Brailovsky Ya. Analysis of contact thermal conductivity of thermal bridges in cryogenic systems // CD-Room of Full texts of 20-th Congress IIR/IIF, «Refrigeration into the Third Millenium», 19-24. September.-1999 -Sydney.- Australia.-Fail 319.

## АНОТАЦІЯ

Брайловський Я.Л. Наукові основи розробки ефективних і надійних систем забезпечення кріогенними рідинами і газами. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.14-Холодильна та криогенна техніка, системи кондиціонування.-Одеська державна академія холоду, Одеса, 2000.

Робота присвячена теоретичним та експериментальним дослідженням кріосистем «резервуар-насос» (КСРН). Розроблені нові схеми, які дозволили знизити втрати рідини, збільшити кавітаційний запас рідини, коефіцієнт подачі насосу та довгочасність безперервної роботи КСРН. Розроблено класифікатор схем та їх математичні моделі. Дано аналіз ефективності розглянутих схем. Приведені системи захисту насосу від зриву подачі та системи гасіння пульсацій високого тиску, які розроблені і з успіхом використовуються на діючих стендах. Вперше сформульовані та вирішені характерні для теплових мостів КСРН задачі нестационарної та стаціонарної теплопровідності тіл та з'єднань. На цій основі розроблено узагальнену теорію теплових мостів КСРН. Розглянуті розроблені експериментальні стенди, результати досліджень. Встановлено достовірність розроблених математичних моделей. Показана доцільність іспиту насосу на моделюючих рідинах та застосування насосів з безредукторним приводом.

Ключові слова: схема, випорожнений резервуар, стороння ємкість, насос, тепловий міст, кавітаційний запас, виток, теплопровідність, теплообмін, втрати рідини, ізоляція, тепловий потік.

#### АННОТАЦІЯ

Брайловский Я.Л. Научные основы разработки эффективных и надёжных систем обеспечения криогенными жидкостями и газами. - 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, 2000.

Робота посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям кріосистем «резервуар-насос» (КСРН), являющихся неотъемлемой составной частью комплексов хранения, транспортирования и газификации криогенных жидкостей и низкотемпературных сжиженных газов. На основании литературных данных и патентного поиска рассмотрены наиболее важные проблемы конструирования и теоретические аспекты разработки и внедрения КСРН высокого давления. Показано, что наиболее актуальными являются направления исследований, связанные с практической разработкой и математическим моделированием схемных решений, созданием

надежных систем защиты НСГ от срыва подачи и коммуникаций высокого давления от вредного влияния пульсаций, с разработкой математических моделей тепловых мостов при граничных условиях, характерных для условий эксплуатации их в оборудовании КСРН, и перспективными разработками по снижению затрат при проектировании и внедрении.

На основе предложенной модели планирования показателей назначения и впервые созданного системного классификатора схем КСРН разработаны новые схемы, полученные за счет различной компоновки оборудования и организации циркуляционного контура, протекающей через поршневые уплотнения утечки, которые позволили снизить потери жидкости, увеличить кавитационный запас, коэффициент подачи НСГ и продолжительность непрерывной работы. Рассмотрены проблемы, связанные с реализацией разработанных схем на практике. Показано, что в большинстве случаев они не вызывают особых трудностей и не приводят к существенным затратам.

Разработаны точные и приближённые математические модели схемных решений большинства приведенных в классификаторе схем, базирующиеся на тепловых и материальных балансах процессов в резервуаре, насосе и соединяющих их трубопроводах. Показаны случаи целесообразного использования приближённых решений. Предложены общие виды уравнений расчета кавитационного запаса жидкости по каждому типу схем, удобные для представления на персональном компьютере. Дан анализ эффективности рассматриваемых схем по кавитационной устойчивости и потерям жидкого продукта. Рассмотрена актуальная проблема создания систем сверхвысокого давления с применением компактных насосов одноступенчатого сжатия. Предложены пути ее реализации. Приведены прошедшие успешную экспериментальную проверку системы защиты насоса от срыва подачи и системы гашения пульсаций высокого давления в линии нагнетания, а также конструкции импульсных гасителей, которые успешно применяются в настоящее время на стендах для испытаний выпускаемой продукции АО «Кислородмаш».

Впервые сформулированы и решены характерные для тепловых мостов КСРН задачи нестационарной теплопроводности одиночных тел, контактных соединений, задачи стационарной теплопроводности бесконтактных соединений типа «штык», установлено влияние наиболее важных параметров на температурные распределения и тепловые потоки.

Представлены промышленные и экспериментальные стенды для проведения исследований схем КСРН и тепловых мостов. Проведен анализ полученных результатов. Показано, что результаты экспериментов хорошо согласуются с расчетами, что подтверждает достоверность разработанных математических моделей. Экспериментально доказана целесообразность проведения испытаний серийных образцов насосов на моделирующей жидкости (воде), а также возможность использования поршневых насосов высокого давления с безредукторным приводом повышенной быстроходности.

Применение разработанных математических моделей и результатов практических разработок подтвердили эффективность выполненной работы.

Ключевые слова: схема, опорожняемый резервуар, сторонняя емкость, насос, тепловой мост, кавитационный запас, утечка, теплопроводность, теплообмен, потери жидкости, изоляция, тепловой поток.

#### ABSTRACT

Brailovsky Ya.L. The scientific basis of elaboration efficient and safe systems supply of cryogenic liquids and gases.-Manuscript Tesis for Doctor's Degree in Engineering Scienses in the field 05.05.14-Refrigerating and cryogenic engineering, conditioner sistem's.-Odessa State Academy of Refregaration, Odessa, 2000.

Dissertation is devote to teoretical and experimental researches of cryosystems «reservoir-pump» (CSRP). A new schemes are developed. They are permit decrease losses of liquid, increase NPSH of liquid, volumetric efficiency of pump and duration of continuous work CSRP. The classificator of schemes and mathematical modeles schemes are developed. Analysis of efficiency considering schemes are presented. The systems of pupm protection from failures and systems of the clearing high pressure are presented. They successfully use in the acting stends. Characteristic for thermal bridges CSRP a problems of non-stationary and stationary thermal conductivity solitary skew fields and junctions are formulated and solve. In this basis developed generalized teory of thermal bridges CSRP. Developmental experimental stend, resultes of research are considered. To be worth-while test of pump to model liquid and use pumpes with non-reducing gear drive are demonstrate.

Key words: scheme, empty reservoir, strange capacity, pump, thermal bridge, chilling or cold accumulation, leakage, thermal conductivity, heat exchange, losses of luiquid, insulation, thermal flow.

