

Автореферат
№ 89

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

ЖУНЬ ГЕОРГІЙ ГРИГОРОВИЧ *СІСЧУК*

УДК 621.59(64): 536.2.022:533.581

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ
ПРОМИСЛОВИХ КРІОПОСУДІВ І ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ПРИСТРОЇВ
І ТЕХНОЛОГІЙ НА ЇХ ОСНОВІ**

Спеціальність 05.05.14 – "Холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціонування"

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі "Технічна кріофізика" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Гетманець Володимир Федорович
завідувач лабораторії АТ "Науково-технологічний інститут транскрипції, трансляції і реплікації", м. Харків.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Лавренченко Георгій Костянтинович,
директор ТОВ "Інститут систем перетворення енергії", м. Одеса;

доктор технічних наук, професор
Бондаренко Станіслав Іванович,
Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України;

доктор технічних наук, професор
Юферов Володимир Борисович,
Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України.

Захист дисертації відбудеться "31" 01 2010 р. в 14³⁰ в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.087.01 при Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки України за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці ОДАХ за адресою:

вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

Зісланий "30" 12 2010 року.

Місяць	Лист	№ док-т.	Підпис

В.І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

xv1073
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

Актуальність теми. Сучасний та майбутній прогрес у розвитку багатьох галузей науки, техніки, медицини, тваринництва, вирішенні проблем життєзабезпечення в значній мірі пов'язують з використанням явища надпровідності (в тому числі високотемпературної), чистих та надчистих газів, що отримуються кріогенними методами, а також з впровадженням водневих технологій і низькотемпературних процесів в енергетиці. Для цього необхідне використання значної кількості різних кріопристроїв, кріомностей та кріостатів з найнижкотеплопровідною кріогенною екрано-вакуумною теплоізоляцією (ЕВТІ). Вона представляє розміщену в середовищі оптимального вакууму (вище 10^{-3} Па) систему тонких екранів товщиною (δ) 5...12 мкм з високою променевою відбивною здатністю, розділених прокладковим матеріалом зі значним термічним опором з $\delta = 40$ мкм.

Різке збільшення використання в 60-70 роках у всіх розвинених країнах скрапелених газів в ракетно-космічній техніці, кріомедицині, кріобіології і тваринництві (в новітній технології репродукції кріоконсервованою спермою, розробленій за участю академіка ААНУ професора Ф.І. Осташка), вимагало організації масового виробництва кріобіологічних (та інших) кріопосудів з теплозахистом із ЕВТІ. Для цього дані кріопосуди стали ізолювати прискореним машинним орбітальним "бинтуванням" (за 0,5...1 годину) вузькими смугами ЕВТІ шириною 0,07...0,1 м. При цьому забезпечувався контакт (спряження) адсорбційних елементів вакуумного насосу (на внутрішньому резервуарі) з шарами ЕВТІ та їх торців з поверхнею дренажної горловини кріопосуду з об'ємом холодних парів кріоагенту. Такий теплозахист з ЕВТІ на кріопосудах виявився різко відмінним від калориметричних пакетів ЕВТІ як конструктивно, так і по особливостям протікаючих в них процесів тепломасообміну.

Розроблена технологія машинного ізолювання кріопосуду 2 смугами із здубльованого екранного та прокладкового матеріалу ЕВТІ не досліджувалась, тому була емпіричною (неоптимізованою). Виготовлене таким чином кріогенне обладнання в Україні (та інших країнах) виявилось низькоякісним, оскільки втрати з нього рідких кріоагентів в багато разів перевищували аналогічну характеристику для космічних кріостатів, що ізолювалися дуже повільним ручним методом. Причини цих розбіжностей в той період були незрозумілими для спеціалістів.

Довгий час проблема покращання низькоякісних кріопосудів та різних кріопристроїв не вирішувалась (як в нашій країні, так і за кордоном) із-за відсутності обґрунтованих підходів до експериментальних досліджень особливостей процесів тепломасообміну в їх багатоеlementному теплозахисті, визначення теплопритоків окремо по всім конструктивним елементам та інших характеристик. В зв'язку з цим пропонувалось, наприклад, тепломасоперенос по тепловим мостам і пакету ЕВТІ в кріопосуді вважати незалежними і розраховувати їх по одному ряду співвідношенням. Однак, такий підхід давав значні розбіжності (до 2...4 порядків) з експериментом. Враховуючи це, В.Ф. Гетманець і П.М. Юрченко (ФТІНТ НАНУ, м. Харків) запропонували теплозахист кріопосуду з пакетами ЕВТІ розглядати у вигляді єдиної системи, що складається з усіх конструктивних елементів, між якими процеси тепломасопереносу повинні мати сумісний спряжений характер. Але ці положення ними не були підтвержені ні теоретично, ні експериментально. Спряженість і двомір-

БІБЛІОТЕКА
АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

ність процесів тепломасопереносу в теплозахисті з ЕВТІ на кріопосудах була підтверджена та експериментально досліджена в подальшому здобувачем.

Були відсутні також достатньо апробовані теоретичні співвідношення для дослідження і аналізу процесів, що відбуваються в теплозахисті кріопосуду. Існувала, наприклад, розроблена даними авторами методика теплового розрахунку кріопосудів. Однак вона не мала закінченого вигляду із-за відсутності експериментальних даних. Відома була ще теорія вакуумування матеріалів В.Ф. Гетманця. Але вона також не була закінченою і апробованою, внаслідок невідомості засобів визначення для неї більш як 15 її різних параметрів.

Із проведеного аналізу виходило, що *актуальним* являлась розробка методів дослідження фізичних параметрів і нових особливостей для процесів тепломасопереносу в багатоелементних теплозахисних конструкціях з пакетами ЕВТІ на кріопосудах з рідкими N_2 , H_2 і He та виявлення по ним параметрів з метою оптимізації всіх конструкцій та технологій для удосконалення кріопосудів до рекордних характеристик на термін експлуатації 10...15 років. В цілому дані розробки виконані вперше і мають науковий і практичний інтерес.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках проведення наступних науково-дослідних робіт в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" (НТУ "ХПІ"): 1. Госпдоговірної теми №71418 "Експериментальне визначення температурного поля в кріобіологічному посуді "Харків-34Б", що виготовляються на Харківському заводі транспортного обладнання (ХЗТО), №ДР8007.4199 (1981 р.) (здобувач - відповідальний виконавець). 2. Госпдоговірної теми №71964 "Випробування нових моделей посудів Дьюара "Харків-34Б", №ДР0182.0083562 (1982 р.) (відповідальний виконавець). 3. Госпдоговірної теми №71995 "Дослідження експериментальних кріобіологічних посудів Дьюара з різноманітними схемами монтажу та вакуумування екрано-вакуумних теплоізоляцій", №ДР0183.0072338 (1983 р.) (відповідальний виконавець). 4. Госпдоговірної теми №71995 "Дослідження експериментальних кріобіологічних посудів Дьюара з новими ізоляційними матеріалами", №ДР0183.0072338 (1984 р.) (науковий керівник). 5. Госпдоговірної теми №71995 "Розробка та дослідження кріобіологічного посуду Дьюара "Харків-34Б" з тривалістю збереження до повного випаровування рідкого азоту без доповнення на протязі 240-300 діб", №ДР0183.0072338 (1985 р.) (науковий керівник). 6. Госпдоговірної теми №71694 "Дослідження з метою удосконалення кріобіологічних посудів Дьюара "Х-34Б", №ДР0188.0086543 (1986-1990 р.р.) (науковий керівник). 7. Госпдоговірної теми №71694 "Дослідження теплових характеристик кріобіологічних посудів Дьюара "Х-34Б" та їх ізоляційних матеріалів після 2-х років зберігання рідкого азоту", №ДР 0188.0117329 (1991 г.) (науковий керівник). Крім того, дослідження по темі дисертації виконувались в рамках сумісних з СКТБ з КТ ФТІНТ НАНУ (м.Харків) таких науково-дослідних роботах: 1. "Суперізоляція" по проекту USB-381 Громадянського фонду досліджень та розробок (США, 1998 р.) (виконавець); 2. "Однокомпонентна суперізоляція" за контрактом №7 з фірмою "Orbita LTD" (США, 1999 р.) (виконавець).

Мета і завдання дослідження. Метою цього дослідження є розробка основ

оптимізації конструкцій і технологій, необхідних для вирішення важливої *народно-господарчої проблеми* – організації проектування і серійного виробництва на заводах України кріобіологічних (та інших) кріопосудів і кріосмостей (та на їх основі різних нових кріопристроїв) з теплозахистом із пакетів ЕВТІ для температурного інтервалу від 4 до 120 К з тепловими, вакуумними та іншими характеристиками, кращими світових аналогів. Для їх реалізації вирішувалися наступні принципово нові наукові і технічні задачі:

- виявлення особливостей теплозахисної системи з ЕВТІ на кріопосуді, як об'єкта вдосконалення методом рішення задачі оптимізації;
- розробка нових наукових підходів, створення оригінальних методик і установок для проведення експериментальних досліджень в кріопосудах;
- дослідження розрахунків, теоретичні та експериментальні основних закономірностей і фізичних параметрів багатомірного тепломасообміну в теплозахисних спряжених конструкціях традиційних кріопосудів для визначення причин низької ефективності та оприділення значень для всього комплексу виявлених оптимізуючих параметрів;
- доробка і доведення до практичного застосування неробочих теорій процесів вакуумування і газовідділення матеріалів та теплового розрахунку кріопосудів, встановлення можливого застосування для їх оптимізації;
- виявлення особливостей фізичних процесів на поверхні і в структурі вакуумуємих матеріалів (за допомогою доробленої теорії вакуумування і газовідділення матеріалів) з метою розробки прискореного процесу відкачки кріопосудів;
- розробка всіх конструкцій і технологій для реалізації значень комплексу виявлених оптимізуючих параметрів з метою вдосконалення кріопосудів;
- впровадження на заводі ХЗТО розроблених оптимізованих конструкцій і технологій в серійне виробництво 7 типів високоефективних кріобіологічних посудів;
- розробка нових кріовакуумних і кріoadсорбційних пристроїв на базі оптимізованих кріопосудів для виконання різних енергозберігаючих технологій.

Об'єктом дослідження являються різні промислові кріопосуди та розроблені на їх основі нові кріовакуумні та кріoadсорбційні пристрої.

Предметом дослідження є тепломасообмін в багатоелементній спряженій конструкції теплозахисту з ЕВТІ на кріопосудах, кріовакуумних і кріoadсорбційних пристроях при температурах від 4,2 до 420 К на протязі від 10 діб до 10 років безперервних процесів.

Методи дослідження: розрахункові, теоретичні та експериментальні дослідження тепломасообміну в ЕВТІ на кріопосудах; теплофізичні методи виявлення особливостей двомірних процесів тепломасообміну в спряжених теплозахисних конструкціях кріопосудів (та різних кріопристроїв) при температурах 4,2, 20,4, і 77,4 К; газодинамічні методи встановлення закономірностей процесів масопереносу і газовідділення для ізоляційних матеріалів і пакетів ЕВТІ при вакуумуванні та в середовищі продувочних газів; сумісні теплофізичні і газодинамічні методи виявлення особливостей спряженого процесу тепломасообміну між багаточаровим пакетом на кріопосуді і компонентами газової суміші, що вакуумуються (продуваються) через даний пакет; адсорбційний метод визначення особливостей сорбційних процесів

для продуктів газовідділення на адсорбентах вакуумних насосів кріопосудів; механічні методи контролю зусиль натягу для смуг ЕВТІ при ізолюванні кріопосудів, а також виявлення вдосконалості використовуємих у кріопосудах конструктивних елементів за допомогою ударних навантажень на вібростенді; електричні методи визначення статичних зарядів, які виникають на смугах ЕВТІ від тертя при ізолюванні та погіршують їх характеристики; хроматографічний метод аналізу складу газів.

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

1. Встановлено, що використання холоду парів кріоагентів для зменшення теплопритоків у кріопосудах обмежується слабкою контактною взаємодією між торцями ЕВТІ і поверхнею горловини. Показано, що інтенсифікація даного процесу до максимальної величини ($E_{x,max}$) досягається заміною контактного теплообміну між ними на теплопровідність через клейову основу (яка міститься в 14-16 шарах скловуалі), нерівномірним розподілом торців ЕВТІ (за встановленим законом) по горловині та ізолюванням їх на кріопосудах з оптимальними зусиллями натягу ($P_{3,0}$).
2. Встановлено, що в пакетах ЕВТІ на кріопосудах існують області з адитивним сумуванням складових теплопереносу і неадитивним, при яких їх теплопровідність λ_{ef} збільшується на 40...50 %. Виявлено, що неадитивність процесів теплопереносу в ЕВТІ усувається ізолюванням її смугами з оптимальними зусиллями натягу $P_{3,0}$.
3. Показано, що при оптимальному вакуумі ($P_0 \leq 10^{-3}$ Па) мінімальна теплопровідність для пакетів ЕВТІ ($\lambda_{ef,min}$) досягається при однаковому вкладі променевої (λ_n) та контактної-кондуктивної ($\lambda_{к.к.}$) складових і для одержання цієї умови розроблено метод зменшення вкладу $\lambda_{к.к.}$ шляхом машинного ізолювання смугами ЕВТІ з оптимальними зусиллями натягу $P_{3,0}$ і шириною розкрою матеріалу на смуги h_0 .
4. Встановлено, що після відкачки з поверхні матеріалів моношару і припинення вакуумування, утворюємія після цього знову на їх поверхні моношар із молекул продуктів газовідділення не стає абсолютним непроникаємім бар'єром подальшому газовідділенню із внутрішньої структури і не перешкоджає зростанню тиску в пакетах ЕВТІ, а лише уповільнює їх в 7-10 разів.
5. Показано, що інтенсивність газовідділення із матеріалів теплозахисного пакету в середовище малоадсорбуємих газів (He, Ar) при швидкостях продувки більших критичного значення (5 л/хв) досягає такого ж рівня, як у вакуумі.
6. Показано, що збільшення ступеня чорноти екранів в пакетах ЕВТІ на кріопосудах (до ~3 разів) від утворюємих в них при температурах нижчих ~240 К шарів кріоконденсату із відкачуємих продуктів газовідділення усувається змінням напрямку їх відкачки в сторону зовнішньої теплої стінки кріопосуду шляхом збільшення перфорацією газопроникнення шарів ЕВТІ з температурою вищою 240 К.

Оптимізація кріопосудів із урахуванням вказаних наукових положень дозволила збільшити ресурс роботи R_{max} кріопосудів (наприклад, X-34Б в ~3,6 разів) та довести їх теплові характеристики до кращих за світові аналоги.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується задовільною кореляцією (з похибкою 10...15 %) між експериментом й теорією для наступних результатів: основних критеріїв оптимізації кріопосудів $\lambda_{ef,min}$, $E_{x,max}$ і P_0 ; залежностей тиску $P(\tau_n)$ і газовідділення $W(\tau_n)$ для ізоляційних матеріалів в адсорбційному і дифузійному режимі вакуумування при

290...420 К; залежностей теплових характеристик від геометричних розмірів горловини і теплопровідності; для величин теплопритоків по конструктивним елементам; для ізотерм адсорбції молекул H_2O і N_2 в моношарі на ізоляціях; досвідом експлуатації, створених на основі кріопосудів різних кріопристроїв.

Наукове значення роботи. В роботі вперше:

- розроблені принципи отримання істинних теплопритоків по всім конструктивним елементам кріопосуду без впливу теплообміну з парами кріоагенту та досягнення максимального теплопереносу між торцями пакету ЕВТІ та поверхнею горловини для зменшення теплопритоків по теплоізоляції кріопосуду;
- отримані температурні залежності коефіцієнту теплообміну в неізотермічній горловині кріопосуду з парами кріоагенту $\alpha_n(T)$ з урахуванням впливу спряженого теплообміну на її поверхні з торцями пакету ЕВТІ для аналізу ефективності;
- розроблені принципи отримання істинних температурних залежностей коефіцієнтів теплопровідності $\lambda_{ef}(T)$ для різних ЕВТІ безпосередньо на кріопосуді в інтервалі від 4,2 до 300 К за час одного експерименту (що в 7...10 разів швидше та на багато дешевше ніж на калориметрі) для вибору найбільш ефективних ЕВТІ;
- дороблена до практичного застосування теорія вакуумування $P(\tau_n)$ і газовідділення $W(\tau_n)$ матеріалів для вивчення особливостей фізичних і адсорбційних процесів на їх поверхні з метою прогнозування довготривалого (до 10 років) вакуумування пакетів ЕВТІ на кріопосудах з оптимальним вакуумом $P_0 \leq 10^{-3}$ Па;
- дороблена до практичного застосування методика теплового розрахунку кріопосудів для теоретичного дослідження багатомірних процесів теплопереносу в спряжених багатоелементних конструкціях теплозахисту з різними ЕВТІ та використанням холоду парів кріоагентів;
- розроблено принцип удосконалення різних кріопристроїв (кріопристроїв) з теплозахистом із ЕВТІ по комплексу із 30 виявлених оптимізуючих параметрів на температурний рівень від 4,2 до 120 К і довготривалий термін експлуатації (до 10 років) з тепловими, вакуумними та іншими характеристиками, кращими світових аналогів;
- розроблена нова багатошарова (до ~100 шарів) система перфорованих екранів із змінною температурою по товщині та мінімальним її перепадом між екранами (до ~3 К), що обумовлює при вакуумуванні газів через неї, розділення їх на окремі компоненти (за теплою адсорбції і конденсації), отримання на ~1,5 порядку більш низького вакууму (в порівнянні з кріонасосами) та дозволяє виділяти при десорбції до 65 % кожної компоненти із відкачаної газової суміші в чистому вигляді.

Практичне значення отриманих результатів:

- встановлено, що теплопровідність λ_{ef} пакетів ЕВТІ на кріопосудах із складною конфігурацією по товщині необхідно визначати по їх середньо-інтегральній товщині $\delta_{с.і.}$ по всій поверхні і без використання в них холоду парів кріоагентів. Тільки при таких параметрах характеристики ЕВТІ на різних кріопосудах являються істинними і їх можливо порівнювати між собою;
- розроблена нова найбільш низькотеплопровідна із наявних ЕВТІ – комбінована (з застосуванням 2...4 різних ЕВТІ по товщині теплоізоляції на кріопосуді) з теплопровідністю $\sim 3,4 \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹, яка в ~11 разів нижча за раніше використовуємі ЕВТІ із скловуаллю ЕВТІ-7;

- встановлено, що змонтована на поверхні горловини пориста структура із підмоточного шару склоуалі ЕВТІ-7 і торців ЕВТІ представляє вакуумний канал в пакеті ЕВТІ, який обумовлює в ньому двовірність процесу масопереносу та прискорення його вакуумування в 2,5-3 рази;
 - виявлено експериментально на різних матеріалах, що і після 10 років їх вакуумування в дифузійному режимі процес газовідділення із них не припиняється, лише уповільнюється в 80...160 разів. Це необхідно враховувати при розробці адсорбційних вакуумних насосів для криопосудів;
 - розроблені методики та пристрої для проведення експериментальних прискорених (в 60...120 разів) перевірок довгострокових (на строк експлуатації до 10 років і більше) характеристик і надійності основних конструктивних елементів, які використовуються в промислових криопосудах;
 - виявлено, що погіршення теплових характеристик криопосудів на 22-25 % від деформації пакетів ЕВТІ вздовж горловини та утворення між ними щілин в результаті динамічних експлуатаційних навантажень усувається приклеюванням торців ЕВТІ до горловини через шар склоуалі;
 - впроваджені вдосконалені конструкції і технології на заводі ХЗТО для проектування та виготовлення 7 типів кріобіологічних посудів ємністю від 0,005 до 0,035 м³ з тепловими, вакуумними та іншими характеристиками, кращими за світові аналоги. Це знайшло відображення в 9 науково-дослідних роботах, які проводяться в НТУ "ХПІ" з 1980 року по теперішній час. Від впровадження результатів виконаних госпдоговірних робіт №71418, №71964, №71995 і №71694 на заводі ХЗТО отримано значний економічний ефект. Дані криопосуди використовуються в Україні та інших країнах в тваринництві, кріомедицині, кріобіології і других галузях;
 - результати дисертаційної роботи також використані при розробці: криопосудів для рідкого Н₂ і СН₄ в Інституті проблем машинобудування ім. А.Н. Підгорного НАНУ; нових композиційних прокладкових матеріалів для пакетів ЕВТІ і теорії розрахунку теплозахисту криопосудів в ФПНТ НАНУ; кріогенераторів, накопичувальних ємностей, надпровідних магнітних сепараторів в Національному науковому центрі "Харківський фізико-технічний інститут" НАНУ; теплозахисту для пожежного автомобіля вуглекислотного пожежогасіння в Науково-дослідному відділі №1 Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки МВС України.
- Розроблені в дисертації технології і конструкції для виготовлення вдосконалених криопосудів та різних нових кріопристроїв нагороджені дипломами на Регіональній виставці в 2000 та 2006 рр.
- Матеріали дисертаційної роботи використовуються в учбовому процесі НТУ "ХПІ" зі спеціальності 7.090507 "Кріогенна техніка і технологія". За цими матеріалами дисертант розробив новий учбовий курс "Енергозберігаючі кріогенні технології", створив лабораторний практикум з 14 робіт.
- Особистий вклад здобувача в одержанні наукових результатів полягає:** в висуненні їх ідей, розробці методів оптимізації криопосудів, виконанні наведених в роботі розрахункових, теоретичних та експериментальних досліджень, виявленні комплексу із 30 параметрів для оптимізації конструкцій і технологій, їх реалізації в серійне виробництво кріобіологічних посудів на заводі ХЗТО з тепловими, вакуумними та іншими характеристиками, кращими світових аналогів. Він підтверджується

23 самостійними науковими публікаціями.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи докладались і обговорювались на: III Всесоюзній конференції з кріогенної техніки, м. Балашиха, НПО "Кріогенмаш", 1982 р.; Всесоюзному семінарі "Науково-технічні проблеми кріогенної техніки і кондиціонування", Москва, МВТУ ім. Баумана, 1985 р.; Всесоюзній науково-практичній конференції "Інтенсифікація виробництва і застосування штучного холоду", Ленінград, 1986 р.; IV Всесоюзній науково-технічній конференції з кріогенної техніки, Москва, 1987 р.; IX Міжнародній конференції, Чехословаччина, м. Усті-над-Лабой, 1988 р.; I Міжнародній конференції з техніки низьких температур, Чехословаччина, м. Кошице, 1990 р.; Міжнародній науково-практичній конференції "Кріогенна техніка – науці та виробництву", м. Москва, 1991 р.; Міжгалузевому науково-практичному семінарі, м. Харків, 1996 р.; X Міжнародній конференції по кріоохолоджувачам, США, Каліфорнія, м. Монтерей, 1998 р.; Регіональній виставці - ярмарку "Наука Харківщини – 2000"; IV Міжнародному симпозиумі "Вакуумні технології та обладнання", м. Харків, 2001 р.; Науково-практичній конференції "Інтегровані технології і енергозбереження", Крим, М. Маяк, 2001 р.; II Міжнародній конференції "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології", м. Одеса, 2002 р.; Науково-практичній конференції з питань виготовлення і використання кріогенної техніки і обладнання в тваринництві України, м. Київ, "Експоцентр України", 2004 р.

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 48 статтях в наукових журналах і збірниках, 15 тезах конференцій а також 2 авторських свідоцтвах.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається з вступу, 7 розділів, висновків, списку бібліографічних джерел з 295 найменувань і Доповнень. Повний об'єм дисертації складає 513 сторінок, з яких основна частина викладена на 304 сторінках, має 122 рисунки і 51 таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані цілі і основні задачі дисертаційної роботи, викладені наукові положення, що захищаються. Визначена наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, приведена її загальна характеристика.

В першому розділі проведено огляд літератури та обґрунтовано вибір напрямку досліджень. Встановлено, що внаслідок складності багатомірних процесів тепломасопереносу в багатоелементному теплозахисту з ЕВТІ не існували досить обґрунтовані експериментальні методики й апробовані співвідношення для їх дослідження з метою вдосконалення низькоякісних криопосудів. У зв'язку з цим зроблено висновок, що поліпшення характеристик даних кріопристроїв можливо здійснити лише методом їхньої оптимізації.

В загальному виді рішення цієї задачі складається з визначення

$$\text{opt}(x) \rightarrow \max f(x), x \in X \quad (1)$$

при обмеженнях типу рівностей і нерівностей, де x - компоненти вектора незалежних змінних X . Цільовою функцією такої оптимізації, наприклад, для нашої системи

"кріопосуд - рідкий кріоагент" буде ресурс роботи R цієї системи при разовому заповненню. Таким чином $f(x) \equiv R$. При максималізації рішення задачі (1) для системи повинно бути одержано максимальний ресурс роботи (R_{\max}).

Було очевидно, що при такій оптимізації ресурси роботи R_{\max} кріопосудів можливо отримати лише за умов досягнення для їх ЕВТІ мінімальної теплопровідності $\lambda_{\text{ef.min}}$ (близької до їх калориметричних зразків), оптимального вакууму $P_0 \leq 10^{-3}$ Па та максимального використання в них холоду парів кріоагентів $E_{x,\max}$ для зменшення теплопритоків (близького до граничного розрахункового для кріоагента). Із цього слідувало, що цільове наукове завдання даної роботи полягає в досягненні максимального ресурсу роботи R_{\max} для кріопосуду, як функції 3 його основних характеристик (представляючих 3 головних критерія їх оптимізації):

$$R_{\max} = f[\lambda_{\text{ef.min}}, E_{x,\max}, P_0(\tau_e)] \quad (2)$$

Найбільш ефективні значення для основних характеристик кріопосудів $\lambda_{\text{ef.min}}$, $E_{x,\max}$ та $P_0(\tau_e)$ повинні обумовлюватися в свою чергу оптимальними величинами їх параметрів. Ці параметри необхідно було вперше виявити пошуково-аналітичним шляхом із результатів розрахункових, теоретичних і експериментальних досліджень нових особливостей і закономірностей та фізичних параметрів багатомірного процесу тепломасопереносу в багатоелементних спряжених конструкціях теплозахисту з ЕВТІ (ускладнених погіршувачими факторами) на кріопосудах. Для проведення даних досліджень були запропоновані нові наукові підходи, розроблені оригінальні методики і необхідні установки, та використано більше 7000 кріопосудів.

В процесі даних досліджень приставляло також значний інтерес виявлення комплексів параметрів для вдосконалення наступних конструкцій і технологій: які усувають із теплозахисту кріопосудів всі фактори, що погіршують їх теплові характеристики (K_n); характеризують технологію машинного прискореного ізолювання пакетами ЕВТІ з мінімальною теплопровідністю (K_m); забезпечують максимальний ступінь використання в кріопосуді холоду парів різних кріоагентів для зменшення теплопритоків (K_x); захищають адсорбент вакуумного насосу кріопосуду від "отруйної" дії на його сорбційні центри молекул H_2O , CO_2 і других із відкачуємих продуктів газівідділення (K_a); прискорюють процес дегазації пакету ЕВТІ і отримання в них оптимального газівідділення W_0 та вакууму P_0 (K_v). Крім того, із результатів таких досліджень необхідно було вибрати для використання в кріопосудах найбільш ефективні сучасні ізоляційні (M_i), адсорбційні (M_a) та конструктивні (M_k) матеріали. Слід відзначити, що в літературі подібні дослідження не описані.

Другий розділ присвячений опису методик для проведення дисертаційних досліджень. Розроблено для цього більше 20 оригінальних методик, які дозволили: провести дослідження полів температури і тиску в повздовжньому і поперечному шарам ЕВТІ напрямку з метою визначення в них особливостей процесів тепломасопереносу; вивчити сумісний спряжений локальний теплообмін з парами азоту всередині горловини і на її поверхні із торцями ЕВТІ для встановлення їх впливу на ступінь використання холоду парів в кріопосуді; виявити особливості спряженого тепломасообмінного процесу між продуктами газівідділення та адсорбентом вакуумного насоса для визначення причин їх низької ефективності та багатьох інших процесів (описаних в дисертації). При цьому однією з найбільш важливих із них являється

розроблена методика для визначення в кріопосуді теплопритоків сумарних Q_c (ваговим або об'ємним способом з похибкою 0,4...0,7 %), а також по кожному конструктивному елементу згідно з співвідношенням (3) для аналізу досконалості їх конструкцій:

$$Q_c = Q_r + Q_n + Q_{r.z.} + Q_l \quad (3)$$

Складові сумарних теплопритоків (при використанні і без використання холоду парів кріоагентів в кріопосуді) по горловині Q_r , пробці Q_n і парам кріоагенту в газовому зазорі між горловиною і пробкою $Q_{r.z.}$ знаходились по їх середній теплопровідності λ_{cp} і градієнту температури ΔT на самих нижніх холодних ділянках даних елементів (висотою $l = (5...7) \cdot 10^{-3}$ м), виміряному за допомогою диференціальних термодар з точністю $\pm 0,1$ К:

$$Q_r(Q_n, Q_{r.z.}) = \frac{\lambda_{\text{cp}} \cdot F \cdot \Delta T}{l} \quad (4)$$

Знайдена після цього з рівняння (3) величина теплопритоків по пакету ЕВТІ Q_i кріопосуду (без охолоджуючого ефекту парів кріоагенту) дозволяла визначити її теплопровідність (з точністю 3...5 %) по рівнянню Фур'є з використанням середньоінтегральної товщини пакета ЕВТІ $\delta_{\text{ср.і}}$ по всій поверхні теплоізоляції (F_c):

$$\lambda_{\text{ср.і}} = \frac{Q_i \delta_{\text{ср.і}}}{F_c \cdot \Delta T} \quad (5)$$

Порівняння отриманого значення $\lambda_{\text{ср.і}}$ з аналогічною характеристикою для калориметричного зразка даної теплоізоляції дає можливість оцінити ефективність змонтованого пакету ЕВТІ з середньоінтегральною товщиною $\delta_{\text{ср.і}}$. Таким способом досліджувались залежності $\lambda_{\text{ср.і}}$ для пакетів ЕВТІ від їх композиційного складу, температури, тиску газів, монтажних параметрів, особливостей процесу теплообміну між спряженими елементами теплозахисту кріопосуду та інших параметрів.

В третьому розділі наведені результати виконаних досліджень на кріопосудах традиційних типів і конструкцій для встановлення причин їх неефективності, виявлення нових особливостей механізмів тепломасообміну в шарах ЕВТІ та ступеня використання в них холоду парів кріоагентів для зменшення теплопритоків.

Аналіз теплових характеристик низькоякісних кріобіологічних посудів показав, що доля теплопритоків по теплозахисту із ЕВТІ, склопластиковим горловинам, полістироловим пробкам та газовому зазору (між горловиною і пробкою) складає, відповідно, 72...79, 12...17, 7...9 та ~2 % від сумарних Q_c . Теплопровідність їх ЕВТІ досягала $(34...39,5) \cdot 10^{-5}$ Вт \cdot м $^{-1}$ ·К $^{-1}$, яка в 11...12,7 рази була вищою за калориметричні зразки. Із цього слідувало, що для вдосконалення даних кріопосудів необхідно, насамперед, покращувати теплозахист, а із теплових мостів – горловини. Слід відзначити, що в оптимізованих нами в подальшому кріопосудах доля теплопритоків по ЕВТІ (із сучасних найбільш ефективних матеріалів) складає лише 35...40 % від Q_c . Наступне покращання їх характеристик можливе, в основному, за рахунок використання більш низькотеплопровідних матеріалів для горловин та пробок.

Встановлено експериментально, що в пакетах ЕВТІ на кріопосудах процес тепломасообміну має двомірний характер. Про це свідчать зміни вздовж шарів тепло-

ізоляції в напрямку вузла торці ЕВТІ - горловина (з парами кріоагенту всередині): температури на 8...30 К (крива 3, рис. 1) та тиску від 10^{-3} до 10^{-5} ... 10^{-6} Па (біля горловини (залежність 6)). В поперечному напрямку шарів ЕВТІ параметр Р змінюється від 10^{-3} Па (біля теплої стінки) до 10^{-6} ... 10^{-5} Па біля внутрішнього резервуара з вакуумним насосом, а температура – згідно профілям $T(x/\sigma)$ 1 і 2.

Показано, що експериментальні залежності для двовірних процесів тепломаєпереносу в теплозахисті кріопосудів відрізняються на 2...4 порядки від розрахованих за одновірними співвідношеннями (зіставити залежності $P(T)$ 7 і 8, рис. 1).

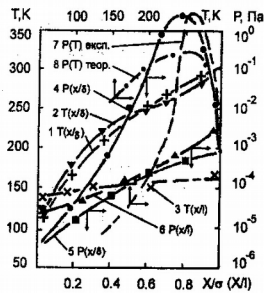
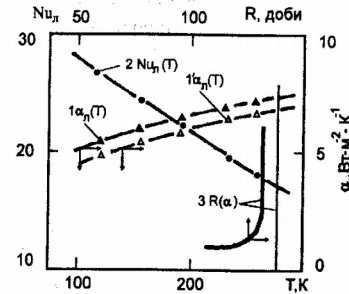


Рис. 1. Розподіл температури та тиску в пакеті ЕВТІ в повздовжньому (x/l) і поперечному (x/σ) його шарам напрямку на низькоякісному кріопосуді з рідким N_2 .

Рис. 2. Залежність локальних коефіцієнтів теплообміну (α_n) з парами N_2 всередині горловини і їх чисел Нусельта (Nu_n) від температури, а також ресурсу кріопосуду (R) від середньоінтегрального значення параметра α : 1, 2, 3 і 1' – кріопосуди з повним і неповним теплообміном на поверхні горловини, відповідно.



Теплова ефективність кріопосудів в значній мірі повинна визначатися (згідно з теорією) ступенем використання в них холоду парів кріоагентів для зменшення сумарних теплопритоків. Даний процес починається в горловині. Встановлено експериментально, що ефективність цього процесу в кріопосуді визначається взаємозв'язком між теплообміном на поверхні горловини (K) з торцями ЕВТІ та всередині з парами кріоагента (α) шляхом теплопровідності через стінку горловини.

Виявлено, що з підвищенням ступеня використання холоду парів (шляхом оптимізації) в теплоізоляції, наприклад, кріопосуду з рідким N_2 з 72 % до максимальної величини $K_{max} = 96$ % (від граничної розрахункової) середньоінтегральний коефіцієнт теплообміну α_n , з парами кріоагента зростає з 4,2 до максимального значення $\alpha_{max} = 5,8(\pm 6...8 \%)$ Вт/(м²·К) (залежності $\alpha_n(T)$ 1 та 1' на рис. 2). При цьому недорекуперація на теплому кінці горловини ΔT_n стає мінімальною ($\Delta T_{n,min} < 0,6$ К). Встановлено, що досягнутий коефіцієнт α_{max} забезпечує практично максимальне використання в горловині холоду парів N_2 (про що свідчить залежність $R(\alpha)$ 3 на рис. 2) за рахунок механізму природної конвенції, який визначено по середньоінтегральному значенню числа Nu із залежності $Nu_n(T)$ 2. Дані результати показують, що

багатоелементний теплозахист кріопосудів треба розглядати як єдину систему із складними спряженими процесами тепломасообміну. Отримана для горловини експериментальна залежність $\alpha_n(T)$ 1 апроксимується поліномом:

$$\alpha_n(T) = 2,5757 + 0,1139T - 5,2313 \cdot 10^{-4}T^2 + 8,347 \cdot 10^{-7} \cdot T^3. \quad (6)$$

Вона була використана в теорії теплового розрахунку кріопосуду.

Розроблені методики і пристрої, що дозволили вперше експериментально визначити ступінь використання холоду парів в кріопосудах згідно з рівнянням:

$$E = Q_{\Sigma B.O.} / Q_{\Sigma O.}, \quad (7)$$

де $Q_{\Sigma B.O.}$ і $Q_{\Sigma O.}$ - сумарні теплопритоки без використання та при застосуванні даного теплового ефекту, відповідно. Встановлено, що однією з причин низької якості кріопосудів, що виготовлялися раніше, являлось незначне (всього ~19 %) в них використання холоду парів. Запропоновано ефективність спряженого теплообміну між торцями ЕВТІ і горловиною (з об'ємом парів кріоагенту всередині) визначати з результатів порівняльного аналізу для них випаровуємості і температурних профілів $T(\delta)$ для торців ЕВТІ і $T(l)$ вздовж горловини, відповідно (рис. 3). Знайдено, що в низькоякісних кріопосудах різниця між цими температурами в центральній частині ЕВТІ складає значну величину 16...20 К (залежності 1, 2), внаслідок неефективного теплообміну між ними. Показано, що довготермінова висока ступінь використання холоду парів в пакеті ЕВТІ досягається після заміни контактного теплообміну між поверхнею горловини і торцями ЕВТІ (точка 1, рис. 4) на теплопровідність між ними через клеєву структуру із скловуалі ЕВТІ-7 (яка містить клей ПІВА). Оптимальна кількість шарів ЕВТІ ($n_{к.о.}$) визначалась з експериментальних досліджень, результати яких на прикладі двох різних композицій ЕВТІ показані на рис. 4 залежностями 2 і 3. Розроблений комплекс для підвищення ступеню використання холоду парів в кріопосудах до максимального значення складається також з оптимізованої кількості шарів скловуалі ЕВТІ-7 на поверхні внутрішньої колби кріопосуду ($n_{к.о.}$), зусиль натягу для змонтованих шарів ЕВТІ ($P_{з.о.}$) та ширини їх розкрою на смуги ($h_{с.о.}$), способу розподілу торців ЕВТІ вздовж горловини ($N_{н.р.}$), кількості додаткових екранів з Al-фольги товщиною 12 мкм в пакеті ЕВТІ ($E_{Al.o.}$), а також поверхні контакту торців ЕВТІ з горловиною за рахунок їх відбортовки ($F_{відб.}$). Проведеними дослідженнями встановлено, що максимальна ступінь використання холоду парів скраплених N_2 , H_2 та He ($E_{х.мах}$) для зменшення теплопритоків в кріопосудах обумовлюється комплексом K_x із 9 оптимізуючих параметрів (включаючих конструктивні та технологічні признаки). Їх можливо представити як змінні функції:

$$K_x = f(K_{max}, \alpha_{max}, P_{з.о.}, h_{с.о.}, n_{к.о.}, n_{к.о.}, F_{відб.}, E_{Al.o.}, N_{н.р.}). \quad (8)$$

Показано експериментально, що при максимальному використанні холоду парів кріоагентів в кріопосудах з рідкими N_2 , H_2 і He сумарні теплопритоки зменшуються в ~1,6, ~5 і ~40 разів, відповідно. Досягнуті експериментально максимальні охолоджуючі ефекти для даних кріоагентів лише на 3...11 % менші від теоретичних. При цьому виявлено, що в кріопосудах з рідким N_2 у випадку максимального використання холоду парів розходження між температурними профілями $T(\delta)$ і $T(l)$ досягає мінімальної величини 0,5...0,7 К (криві 3 і 4 на рис. 3).

Встановлено експериментально, що використання холоду парів N_2 дозволяє зменшити на 30...35 % енерговитрати при адсорбційній очистці газів.

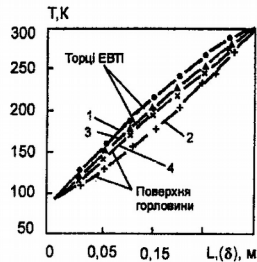


Рис. 3. Зміна температури в вузлі спряженого теплопереносу між торцями ЕВТІ та горловиною.

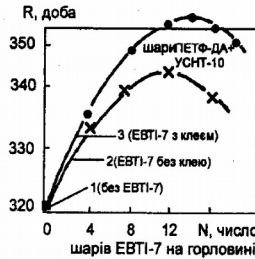


Рис. 4. Залежність ресурсу роботи R кріопосу з рідким N_2 від характеру теплового контакту між горловиною та торцями ЕВТІ через прокладку із скловоالی.

В четвертому розділі експериментально досліджені основні закономірності процесів газовиділення $W(\tau_B)$ і вакуумування $P(\tau_B)$ (які являються найбільш енергоємними при виготовленні кріопосудів) для більш чим 20 нових матеріалів теплозахисту і пакетів ЕВТІ в широкому інтервалі температур (294...420 K) і швидкостей відкачки $V_0 = (2,8 \dots 8,8) \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ за 350 годин і до 10 років безперервного вакуумування. Вперше експериментально підтверджено існування для матеріалів наступних 4 послідовно протікаючих режимів вакуумування і газовиділення (передбачуваних теорією): із вільного об'єму, десорбційного (з полішарів і моношару) та дифузійного. Розроблені експериментальні методи визначення границь між ними. Початок дифузійного процесу газовиділення знаходили по точці перегину на залежності $W(\tau_B)$, яка з'являється при відкачці матеріалів з швидкістю $V_0 \geq 5,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (точки 4, рис. 5) і температурах $T_B \geq 350 \text{ K}$ (точки 5). Знайдений тиск для заповненого на поверхні ізоляцій моношара P_M (точки 6) з молекул H_2O і N_2 на перетині (згідно теорії) дотичних: до точок $P_{3,М}$ (лінії 7, 8, 9) на залежностях $P(\tau_B)$, а також до кривих вакуумування з вільного об'єму (які, практично, співпадають з віссю тиску).

Встановлено, що в десорбційному режимі вакуумування рівень тиску (газовиділення) в системі визначається швидкістю відкачки (відношенням S_P/S_0). Це випливає з порівняння залежностей 1 і 2 (рис. 5), що знаходиться у відповідності з теоретичним співвідношенням:

$$P = [S_P / (S_0 \cdot \alpha_B)] \cdot P_M (\alpha_P \cdot \tau_a + \tau_{PP}) / (\tau_B \cdot \tau_D)^{0,5}, \quad (9)$$

де S_P, S_0 – площі вакуумуємих поверхонь і відкачного отвору; α_B, α_P – можливість вільноту молекул у відкачну систему і їх прилипання при ударі об поверхню, відповідно; $\tau_a, \tau_{PP}, \tau_D, \tau_B$ – час адсорбції молекул, перельоту між зіткненнями, дифузії і вакуумування, відповідно. В той же час в дифузійному режимі величина газовиділення не повинна залежати від швидкості відкачки системи згідно рівняння:

$$W = [0,5 \cdot v_a \cdot n_m / (K_0 \cdot \bar{H} \cdot \tau_D)] \cdot \exp(-\pi^2 \cdot \tau_B / 4\tau_D), \quad (10)$$

де v_a – теплова швидкість руху молекул; n_m – число молекул в заповненому моношарі на одиниці поверхні; \bar{H} – безрозмірний критерій внутрішнього газообміну через поверхню матеріалу; K_0 – безрозмірний параметр, що характеризує інтенсивність відкачки. Це підтверджується для всіх матеріалів погодженням (з точністю 15 %) між експериментальними величинами газовиділення при швидкості відкачки $V_0 = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (точки 10) і аналогічними результатами, отриманими при швидкості відкачки $V_{01} = 2V_0$ (точки 11). Із даних результатів слідувало, що тільки для дифузійного режиму газовиділення є дійсною часовою характеристикою матеріалу. Знайдено, що для досліджених матеріалів дифузійний режим вакуумування досягається при тисках $7 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-1} (\pm 15 \%) \text{ Па}$ і газовиділеннях $5 \cdot 10^{-5} \dots 4 \cdot 10^{-4} (\pm 14 \dots 17 \%) \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис. 5).

Виміряні вперше газовиділення за ~10 років вакуумування при 294 K для 10 різних сучасних матеріалів теплозахисту та сплаву АМц в дифузійному режимі (залежності 1...4, рис. 6). Встановлено, що за цей час газовиділення W не зупиняється, а лише уповільнюється в 80...160 разів до $8 \cdot 10^{-7} \dots 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. При цьому коефіцієнти дифузії D_f із них зменшуються від $\sim 1,5 \cdot 10^{-16}$ до $(2 \dots 3) \cdot 10^{-20} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ (криві 5 і 6, рис. 6). Вони визначались (з точністю 14...17 %) із співвідношення:

$$D_T = l_D^2 / \tau_D, \quad (11)$$

де l_D – товщина дифузійного шару в матеріалі, що вакуумується.

Визначені із результатів досліджень багаторічних залежностей $W(\tau_B)$ об'єми газів, що виділяються V_Z (з точністю $\pm 16 \%$), які необхідні для розрахунку маси адсорбенту для вакуумного насосу. Встановлено, що, наприклад, із ізоляції НТ-10 за 10 років вакуумування виділяється $\sim 8,9 \cdot 10^3 \text{ нсм}^3/\text{кг}$ (залежність 7, рис. 6), із склопластику $\sim 2 \cdot 10^4 \text{ нсм}^3/\text{кг}$ (крива 8), а із сплаву АМц $\sim 14 \text{ нсм}^3/\text{кг}$.

Встановлено, що інтенсивність газовиділення із матеріалів теплозахисту кріопосудів в середовищі малоадсорбуємих газів (He, Ar) при швидкостях їх продувки через них більших критичного значення 5 л/хв.) досягає такого ж рівня, як у вакуум.

Становило інтерес зіставити отримані за тривалий час відкачки експериментальні результати по вакуумуванню $P(\tau_B)$ і газовиділенню $W(\tau_B)$ для досліджених ізоляцій з теоретичними. Для цього необхідно було доробити до практичного застосування теорію вакуумування шляхом отримання додаткових співвідношень та визначення більш як 15 невідомих її параметрів. Запропоновано для рішення цієї задачі використати досліджені залежності $W(\tau_B)$ і $P(\tau_B)$, а також отримані з теорії співвідношення.

Показана в зв'язку з цим послідовність визначення даних параметрів на прикладі ізоляції УСНТ-10 і ЕВТІ-7. Спочатку з використанням експериментальних даних по газовиділенню для УСНТ-10 при 294 K (залежність 3, рис. 9) через $\tau_{в.н.} = 150$ годин вакуумування ($W_{в.н.} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) і через $\tau_{в.к.} = 200$ годин ($W_{в.к.} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) для цього матеріалу було визначено параметр $\tau_D = 2 \cdot 10^6 \text{ с}$ (тривалість дифузії молекул) шляхом сумісного рішення 2 рівнянь (10) теорії. Потім із

співвідношення (10) (після визначення його параметрів v_a , K_0 і n_m) було встановлено, що критерій газообміну \bar{H} через поверхню УСНТ-10 складає 0,014 ($\pm 15\%$).

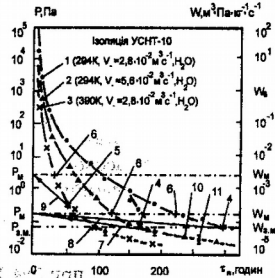


Рис. 5. Зміна процесу вакуумування $P(\tau_B)$ і газовідділення $W(\tau_B)$ для ізоляції УСНТ-10 при різних швидкостях V_O , температурах T_B і часу відкачки τ_B .

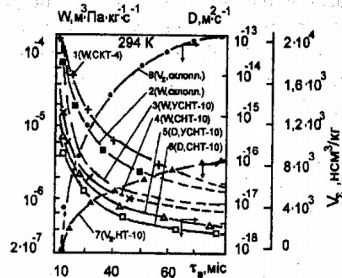


Рис. 6. Зміна процесу газовідділення W_B , об'єму виділених продуктів при газовідділенні V_E та коефіцієнтів дифузії D від часу вакуумування τ_B .

Далі, використовуючи експериментальне значення тиску $P = 0,06$ Па для УСНТ-10 при 294 К через 150 годин вакуумування (крива 3, рис. 9), а також знайдений тиск для молекул H_2O в заповненому на поверхні моношару $P_M = 0,2$ ($\pm 15\%$) Па при даній температурі, було визначено безрозмірний критерій газообміну в системі B' по рівнянню (12) теорії:

$$P = [2P_M / (B'_i)] \cdot \exp[-\pi^2 \tau_B / (4 \cdot \tau_D)] \quad (12)$$

Даний параметр виявився рівним 4,2 ($\pm 17\%$). З отриманих результатів встановлено, що після відкачки моношара процеси вакуумування $P(\tau_B)$ і газовідділення $W(\tau_B)$ для ізоляції УСНТ-10 відповідають дифузійному режиму (оскільки згідно з теорією визначені для цього матеріалу критерії $\bar{H} \ll 1$, а $B'_i \gg 1$), тому вони повинні описуватися залежностями (10) і (12). Для аналізу цих процесів в моношарі необхідно використовувати теоретичні співвідношення (9) і (13).

$$W = 0.25 v_a \cdot n_m / (K_0 \cdot \bar{H} \cdot \sqrt{\tau_B \cdot \tau_D \cdot \pi}). \quad (13)$$

Запропоновано невідому питому поверхню S_n (рівняння 14) для ізоляційних матеріалів (що використовується в теоретичному рівнянні (9)) визначати по ємності молекул H_2O в адсорбованому на поверхні моношара (a_m), шляхом інтегрування виміряних для них кривих газовідділення $W(\tau_B)$ за час їх відкачки (залежності 1...3, рис. 5). Встановлено, що для ізоляцій УСНТ-10 і ЕВТІ-7 при 294 К параметр a_m складає 176 і 151 ($\pm 15\%$) нсм³/кг, а визначені по ним питомі поверхні за рівнянням (14) виявились рівними 617 і 523 ($\pm 17\%$) м²/кг, відповідно.

$$S_n = a_m \cdot \omega_0 \cdot N, \quad (14)$$

де ω_0 – посадочна поверхня, яку займає молекула H_2O в моношарі.

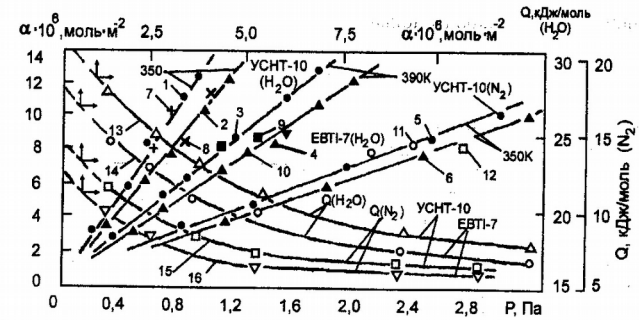


Рис. 7. Ізотерми $a(P)$ та теплоти $Q_a(\alpha)$ адсорбції для молекул H_2O і N_2 на поверхні ізоляції УСНТ-10 і ЕВТІ-7 при 350 і 390 К.

В теорії вакуумування потрібні також дані про параметр $D_{E\Phi}$ (ефективний коефіцієнт дифузії), який визначається за співвідношенням:

$$D_{E\Phi} = D / (1 + K_G), \quad (15)$$

де K_G – коефіцієнт адсорбції Генрі. Методи розрахунку параметра K_G відсутні, тому запропоновано його визначати експериментально із ізотерм адсорбції $a(P)$. Для цього розроблено новий засіб отримання ізотерм адсорбції для ізоляційних матеріалів, що досліджуються, шляхом інтегрування виміряних для них залежностей $W(\tau_B)$ і $P(\tau_B)$ в інтервалі відкачки моношара. Отримані таким чином ізотерми адсорбції $a(P)$ для молекул H_2O і N_2 на УСНТ-10 та ЕВТІ-7 при 350 і 390 К представлені на рис. 7. Встановлено задовільне їх узгодження (з точністю до 15%) з результатами прямих досліджень (порівняти точки 1 і 7, 2 і 8, 3 і 9, 4 і 10). Вони представляють лінійні залежності $a(P)$, які задовільно описуються відомим рівнянням адсорбції Генрі:

$$a = K_G \cdot P. \quad (16)$$

Визначені з них константи K_G , які для ізоляції УСНТ-10 при 390 і 350 К виявились рівними $(0,9$ і $1,67) \cdot 10^{-6}$ моль/(м²·Па), відповідно.

Встановлено, що значне уповільнення (в 1,8...2,3 рази) вакуумування молекул із моношара в кінці процесу (залежності 1...3, рис. 5) обумовлене близьким зростанням теплоти адсорбції Q_a із зменшенням заповнення (a) поверхні (криві 13...16, рис. 7). Залежності $Q_a(a)$ отримані із ізотерм адсорбції (рис. 7) згідно рівняння:

$$Q_a = \frac{R \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \ln(P_2 / P_1)}{T_2 - T_1}, \quad (17)$$

де P_1 і P_2 – рівноважні тиски адсорбату при температурах $T_1 = 350$ і $T_2 = 390$ К для однакових величин адсорбції.

Важливим параметром теорії вакуумування є час життя молекул в адсорбованому стані τ_a , який, наприклад, використовується в рівнянні (9). Розрахунок його по співвідношенню (18) став можливим після розробки способу визначення тиску P_m

для заповненого на матеріалі моношару:

$$\tau_a = n_m / (K_O \cdot P_M) \quad (18)$$

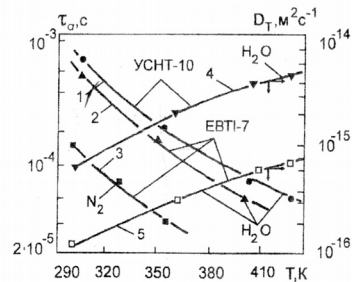


Рис. 8. Залежність часу життя при адсорбції τ_a і коефіцієнтів дифузії D_T для молекул H_2O і N_2 від температури T_B для ізоляцій USHT-10 і EBTP-7.

Отримані значення параметра τ_a для молекул H_2O і N_2 в моношарі на EBTP-7 і USHT-10 представлені на рис. 8 залежностями 1...3. Показано, що менший в 4...5 разів час життя τ_a молекул N_2 в адсорбованому стані (в порівнянні з H_2O) на ізоляції (рис. 8) обумовлює більш високу (в ~2 рази) швидкість їх вакуумування в десорбційному режимі. Встановлено збільшення інтенсивності вакуумування (в 5...6 разів) в даному режимі і з підвищенням температури від 294 до 390 K в результаті зменшення параметра τ_a в 8...9 разів (рис. 8). Показано, що в дифузійному режимі при аналогічному зростанні температури матеріалу швидкість вакуумування також зростає від підвищення (в 7...9 раз) коефіцієнтів дифузії D_T (залежності 4 і 5 на рис. 8).

Запропоновані методики дослідження особливостей фізико-енергетичних процесів на поверхні і в структурі матеріалів, що вакуумуються, можуть бути рекомен-

Рис. 9. Зміна газовідділення $W(\tau_B)$ і тиску $P(\tau_B)$ для ізоляції USHT-10 при 294 і 390 K від часу відкачки τ_B : 1-2 – закінчення відкачки $P(\tau_B)$ і газовідділення $W(\tau_B)$ для моношару в кінці десорбційного режиму (на початку дифузійного процесу) при 390 і 294 K, відповідно.

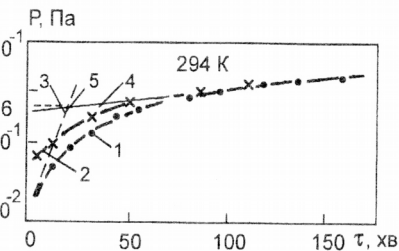


Рис. 10. Зміна тиску над ізоляцією USHT-10 від часу газовідділення із неї молекул H_2O .

довані також для аналізу та управління різними процесами: при вакуумуванні, адсорбції-десорбції в металогідридах, для прискореного визначення питомих поверхонь адсорбентів і каталізаторів та в інших технологіях.

Розроблений на основі встановлених закономірностей прискорений (в 2,5...3,7 разів) процес найбільш енергоємної термовакuumної дегазації криопосудів, який дозволив за регламентований час (τ_a) отримати в ізоляційній порожнині оптимальне газовідділення (W_0) при оптимальній температурі ($T_0 = 390...400$ K). Для цього вибрані ефективні ізоляційні M_i та адсорбційні M_a матеріали теплозахисту спочатку дегазувались в окремій камері на протязі ~24 годин ($\tau_{пл.}$) при температурі ($T_{пл.}$) до тиску ($P_{пл.}$), а потім насичувались (замість відкачених молекул H_2O) сухим N_2 (Γ_H), який має (в порівнянні з молекулами H_2O) менший час і теплоту адсорбції в 4...5,5 і 2...2,5 разів, відповідно. Із даних досліджень встановлено, що прискорений процес дегазації криопосуду для отримання оптимального вакууму P_0 обумовлюється комплексом K_D із наступних виявлених 14 параметрів, що оптимізують його конструкції і технології:

$$K_D = f(W_0, T_0, T_{пл.}, P_{пл.}, P_{роб.}, a_{н.з.}, V_{н.з.}, \tau_D, \tau_{н.Д.}, A_0, \Gamma_H, M_K, M_a, M_i), \quad (19)$$

де для використаних параметрів $V_{пл.}$, $a_{пл.}$, $P_{роб.}$ і A_0 характеристики приведені в співвідношенні (20); M_K – конструктивні матеріали криопосуду.

Після визначення для теорії вакуумування всіх необхідних параметрів за описаними методиками проведено порівняння експериментальних та теоретичних залежностей $W(\tau_a)$ і $P(\tau_a)$ для ізоляцій USHT-10 та EBTP-7. Показано, що в дифузійному і десорбційному режимах експериментальні залежності $P(\tau_a)$ і $W(\tau_a)$ задовільно (з точністю до 12...14 %) описуються теоретичними в діапазоні від 294 до 420 K і від 350 до 420 K, відповідно. Це видно із порівняння на рис. 9 для ізоляції USHT-10 залежностей 3 з 5 (при 294 K), 4 з 6 (для 390 K) та 4 з 8 (при 390 K). Знайдено, що для моношара в інтервалі від 294 до 350 K є значне розходження (до 1,5...2 разів) між теорією і експериментом (зіставити криві 3 та 7 при 294 K). Аналогічні закономірності встановлені і для ізоляції EBTP-7. Для покращання узгодження між теорією і експериментом для моношара в інтервалі 294...350 K запропоновано в теорії враховувати вплив енергетичної неоднорідності поверхні матеріалу на час життя адсорбованих молекул в моношарі при різних заповненнях.

Встановлено (на прикладі ізоляції USHT-10), що після відкачки з поверхні адсорбованих молекул газу і припинення вакуумування розпочинається інтенсивне газовідділення з матеріалу (залежності $P(\tau)$ 1 і 2, рис. 10). В результаті в системі зростає тиск і адсорбція молекул з продуктів газовідділення. По мірі її насичення молекулами, газовідділення уповільнюється в 7...10 разів (рис. 10), досягаючи мінімальної величини після утворення моношара при $P_M = 0,16$ Па (точка 5), але і після цього не припиняється. Виявлені особливості механізму газовідділення (а також враховуючи значний об'єм газу в матеріалах теплозахисту) дозволили пояснити причини швидкого зростання тиску в ізоляційній порожнині криопосуду і підвищення з нього втрат рідкого N_2 після виходу з ладу вакуумного насосу при менших (на 1,5...2 порядки) натіканнях через нещільності.

В п'ятому розділі описані: виявлені фактори, які збільшують теплопровідність

ЕВТІ та погіршують сорбцію адсорбентів в вакуумному насосі криопосуду; встановлені монтажні параметри машинного ізолювання, а також розроблені комплекси параметрів для їх оптимізації.

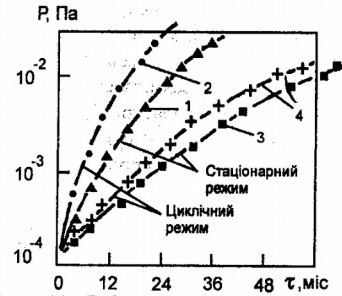


Рис. 11. Зміна тиску в криопосуді з ЕВТІ з неоптимізованою (1, 2) і оптимізованою (3, 4) конструкціями вакуумних адсорбційних насосів від часу їх розкрою на смуги h та діаметра ізолюемого внутрішнього резервуара D .

Встановлено, що на низькоякісних криопосудах використовуюча конструкція адсорбційного вакуумного насоса є недосконалою із-за більш високої температури (на 18...25 К) його адсорбента в порівнянні з холодною стінкою та зниженою на 40...50 % сорбційною здатністю завдяки блокуванню частини поверхні висококиплячими молекулами H_2O , CO_2 та іншими з відкачуємих продуктів газівідділення. Виявлено також стирання в ньому часток вугілля та виділення вугільного пилу в прилеглі шари ЕВТІ, що підвищує їх ступінь чорноти. В криопосудах з такими вакуумними насосами при безперервному зберіганні рідного азоту оптимальний тиск P_0 підтримується на протязі 26...28 місяців (залежність 1, рис. 11), а при здійсненні багаторазових циклів охолодження – нагрівання – охолодження – на протязі 16...18 місяців (крива 2).

Вибраний високоефективний адсорбент вугілля СКТ-4 (M_a) для вакуумного насоса, який в меншій мірі (в порівнянні з іншими) блокується молекулами H_2O та CO_2 . Розроблена його оптимізована конструкція (A_0) з використанням теплозахисних екранів ($E_{z.o.}$), в якій виключається стирання адсорбенту, досягається його охолодження до мінімальної температури (T_{min}) і максимальна адсорбційна здатність до продуктів газівідділення ($a_{n.z.}$) при робочому тиску ($P_{роб}$) та отриманні при дегазації оптимального газівідділення W_0 . Визначені сумарні об'єми газівідділення ($V_{п.г.}$) із матеріалів теплозахисту при багаторічному вакуумуванні для розрахунків необхідної маси адсорбенту для вакуумного насоса. Дані дослідження дозволили встановити, що конструкція та режим роботи вакуумного адсорбційного насоса для досягнення та довгострокової підтримки (на протязі 10...15 років) оптимального тиску $P_0 \leq 10^{-3}$ Па в пакеті ЕВТІ обумовлюється комплексом K_a із значень наступних 8 параметрів, оптимізуючих конструкції і технології для їх виготовлення:

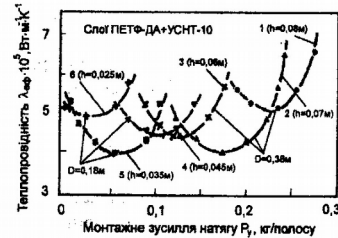


Рис. 12. Залежність теплопровідності λ_{ef} шарів ЕВТІ на криопосуді з рідким азотом від монтажних зусиль натягу P_3 , ширини конструкційних вакуумних адсорбційних насосів від часу їх розкрою на смуги h та діаметра ізолюемого внутрішнього резервуара D .

$$K_a = f(W_0, P_{роб}, T_{min}, A_0, E_{z.o.}, a_{n.z.}, V_{п.г.}, M_a). \quad (20)$$

Показано, що при його використанні в криопосуді ресурс підтримки оптимального вакууму збільшується до 53...63 місяців (в 2,5...3,1 рази), залежності 3 і 4 на рис. 11.

Виявлено експериментально на низькоякісних криопосудах більше 10 погіршуючих факторів, що обумовлюють підвищення теплопровідності їх пакетів ЕВТІ до $(34...39,5) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К) (в 11...12,7 рази) внаслідок зростання наступних складових механізму теплопереносу: молекулярного ($\Delta\lambda_m$) на ~40 % від виникнення склеєних ділянок в шарах ЕВТІ при 150...270 К (в результаті використання прокладок із скловуалі ЕВТІ-7 з клеєною основою) з підвищенням (на ~3 порядки) тиском газу (залежність $P(x/\delta)$ 4, рис. 1); променевого ($\Delta\lambda_n$) на ~41 % від зростання ступеня чорноти екранів ЕВТІ (в 7...10 разів) в результаті попадання вугільного пилу з вакуумного насоса та виникнення на них шарів криоконденсату з відкачуємих продуктів газівідділення; контактено-кондуктивного ($\Delta\lambda_{кк}$) на ~6 % від збільшення щільності шарів ЕВТІ (ρ) в результаті виникнення зарядів стателектрики при ізолюванні та утворення променево-контактно-кондуктивного ($\lambda_{п.к.к.}$) теплопереносу на 13 % від одночасного підвищення щільності і ступеня чорноти шарів ЕВТІ та інших факторів. Встановлено, що для таких ЕВТІ з погіршуючими факторами залежність $\lambda_{ef}(T)$ проходить через максимум при температурах 250...270 К (крива 4 на рис. 1).

Розроблена нова конструкція пакету ЕВТІ, в якій виникнення шарів криоконденсату при температурах нижчих ~240 К усувається зміною напрямку відкачки продуктів газівідділення в сторону зовнішньої стінки криопосуду шляхом збільшення перфорацією газопроникнення шарів ЕВТІ з температурою вищею 240 К.

Визначені (із проведених досліджень) значення для комплексу K_n із наступних 11 виявлених параметрів, які використані для оптимізації конструкцій і технологій, необхідних для виготовлення криопосудів без погіршуючих факторів та з мінімальною (в 11...12,7 рази меншою) теплопровідністю $\lambda_{ef,min}$ їх ЕВТІ:

$$K_n = f(T_0, T_{min}, \delta_{cp.l.}, P_0, W_0, \rho_0, A_0, I_0, Z_n, n_{z.o.}, M_a). \quad (21)$$

де I_0 – оптимізована конструкція пакету ЕВТІ, що виключає можливість виникнення в ньому шарів криоконденсату; Z_n – заземлюючий пристрій для зняття виникаючих зарядів стателектрики при ізолюванні. Встановлено, що для даних пакетів ЕВТІ (без погіршуючих факторів), залежності $\lambda_{ef}(T)$ мають монотонний характер (рис. 14).

Виявлені вперше експериментально 5 монтажних параметрів, які характеризують технологію машинного ізолювання криопосудів смугами ЕВТІ: монтажні зусилля натягу P_3 ; ширина розкрою матеріалу композиції ЕВТІ на смуги h ; товщина шару підмоточного матеріалу на горловині n_r і на внутрішньому резервуарі n_p криопосуду; а також діаметр D внутрішнього ізолюемого резервуару. Розроблено динамометр для контролювання зусиль натягу P_3 смуг ЕВТІ при ізолюванні. Визначені оптимізовані монтажні параметри для 6 сучасних найбільш ефективних ЕВТІ, при яких усувається розбіжність (до 2...4 разів) теплопровідності λ_{ef} для змонтованих ЕВТІ і досягаються їх відтворені (з точністю 10...15 %) значення, близькі до їх мінімальних калориметричних. Це видно на прикладі порівняння на рис. 12 отриманої мінімальної теплопровідності для пакету ЕВТІ $\lambda_{min}=(4,1...4,2) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К) на

кріопосудах діаметром 0,18 і 0,38 м при їх ізолюванні з оптимальними параметрами $P_{3,0}$ (рівними 0,06 і 0,19 кг/смугу) та h_0 (відповідно 0,035 і 0,007 м). Розроблена оптимізована технологія машинного ізолювання різних кріопосудів будь-якими матеріалами ЕВТІ, в тому числі маломіцними (з $\sigma_p < 3$ кг/мм², але найбільш ефективними) з використанням штучних зарядів стателектрики ($Q = (6...8) \cdot 10^{-7}$ кл/м²). Ця технологія обумовлюється комплексом K_M значень для наступних 5 виявлених оптимізуючих параметрів:

$$K_M = f(P_{3,0}, h_0, n_{2,0}, n_{к.о.}, D) \quad (22)$$

Виявлено, що мінімальна теплопровідність $\lambda_{эф, \min}$ для пакетів ЕВТІ (змонтованих з оптимальними монтажними параметрами, як залежності 2 і 5 на рис. 12) визначається однакою вкладом променевої λ_p та контактної-кондуктивної $\lambda_{к.к.}$ її складовими при оптимальному тиску P_0 в ЕВТІ.

Встановлено, що при ізолюванні пакетів ЕВТІ на кріопосудах з оптимальними монтажними параметрами усувається виникнення в них механізму неадитивного сумування складових теплопереносу, при якому їх теплопровідність $\lambda_{эф}$ збільшується на 40...50 %.

Виявлено вперше оптимальні значення для 3 основних характеристик теплозахисту $\lambda_{эф, \min}$, $E_{х, \max}$ та P_0 (основних критеріїв оптимізації), що дозволило виконати цільову задачу (2) цієї роботи — розробку та виготовлення кріопосудів з максимальним ресурсом роботи R_{\max} . При цьому показано, що дані критерії оптимізації $E_{х, \max}$, P_0 і $\lambda_{эф, \min}$ визначаються комплексом, відповідно, з 9 (рівняння 8), 14 (19) та з 11 (21) оптимізуючих параметрів.

Таким чином виявлено, що ресурс R_{\max} кріопосуду (та його основні характеристики) представляють залежність від значень із наступних 30 виявлених параметрів для оптимізації конструкцій і технологій виготовлення таких кріопосудів:

$$R_{\max} = f(\lambda_{эф, \min}, E_{х, \max}, P_0(\tau_0)) = f(T_0, P_0, P_{роб.}, T_{мін}, \delta_{сер.}, W_{0}, T_{н.д.}, \tau_{н.д.}, P_{н.д.}, \alpha_{таж}, K_{таж}, \tau_0, P_{3,0}, h_0, n_{2,0}, n_{к.о.}, \rho_0, a_{н.з.}, \Gamma_{ю}, V_{н.з.}, N_{н.р.}, A_0, I_0, F_{відб.}, E_{Al.0.}, Z_n, D, M_b, M_a, M_{к.}) \quad (23)$$

Складність рішення поставленого оптимізаційного завдання (2) полягала в тому, що вплив більшості із визначених в (23) змінних на параметр R_{\max} носить неаналітичний характер. Тому їхні оптимальні значення (як вказувалося вище) знаходилися у ході складних теоретичних та експериментальних досліджень. Ряд вхідних у функцію R_{\max} змінних мають свої локальні екстремуми, як на рис. 4 і 12.

Виявлено вперше, що встановлені для $\lambda_{эф}$ ЕВТІ на кріопосудах залежності від складу прокладкових матеріалів, їх адсорбційних, вакуумних, оптичних, газодинамічних та інших властивостей дозволяють розробляти композиції для пакетів ЕВТІ з наперед заданими характеристиками. Виготовлені таким чином прокладки АНТ-10 та УНТ-10 дозволили отримати для теплоізоляції найбільш низьку теплопровідність $(3,6...3,8) \cdot 10^{-5}$ Вт·м⁻¹·К⁻¹, яка в ~10,5 рази нижча за ЕВТІ на неоптимізованих кріопосудах. Їх застосування в кріопосудах Х-34Б (ємністю 35 л) дозволило збільшити ресурс роботи з рідким N₂ з 100...110 до 390...400 дб (в ~3,6 рази, рис. 13). Ця характеристика виявилась в ~1,6 рази вищою кращого закордонного аналога - французького кріостата RSV-35A (рис. 13).

Отримана експериментальна залежність $R(\lambda_{эф})$ 9 (рис. 13) може бути викорис-

тана як довідкова при розрахунках. Вона описується поліномом:

$$R(\lambda_{эф}) = 543 - 49,04\lambda_{эф} + 2,416\lambda_{эф}^2 - 3,451 \cdot 10^{-2}\lambda_{эф}^3 \quad (24)$$

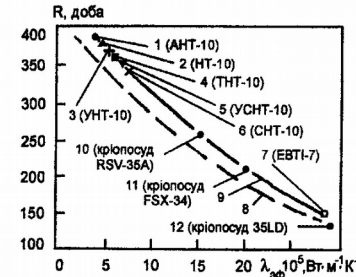


Рис. 13. Ресурс роботи кріопосуду Х-34Б з рідким N₂ із різними сучасними ЕВТІ в порівнянні з кращими закордонними аналогами.

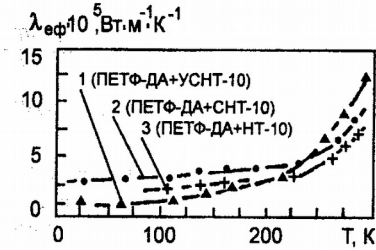


Рис. 14. Температурна залежність коефіцієнтів теплопровідності $\lambda_{эф}$ для різних пакетів ЕВТІ на кріопосудах.

Розроблено засіб виміру температурної залежності для ЕВТІ $\lambda_{эф}(T)$ безпосередньо на кріопосудах. Отримані результати для найбільш ефективних композицій в інтервалі 4,2...294 К, 20,4...294 К та 77,4...294 К представлені на рис. 14. Дані залежності $\lambda_{эф}(T)$ для теплових розрахунків кріопосудів описуються поліномом:

$$\lambda_{эф}(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (25)$$

Для залежності 1 (рис. 14) коефіцієнти даного поліному мають, наприклад, такі значення: $a = 1,046$, $b = 1,233 \cdot 10^{-2}$, $c = -1,357 \cdot 10^{-4}$ і $d = 6,587 \cdot 10^{-7}$.

На вдосконалених кріопосудах визначені температурні залежності коефіцієнтів теплопровідності для ЕВТІ $\lambda_{эф}(T)$ (25), а також теплообміну в горловині з парами азоту $\alpha(T)$ (6), які були використані для розвитку відомої незакінченої методики теплового розрахунку кріопосуду до практичного застосування.

Ця методика В.Ф. Гетманця заснована на рішенні спряжених нелінійних двомірних задач теплопровідності для пакету ЕВТІ (співвідношення (26)) і товстих теплозахисних пробок ($\varnothing 0,05$ м) (рівняння (27)) для горловин кріопосуду, а також одномірних співвідношень теплопровідності (28) для тонких горловин (тов-

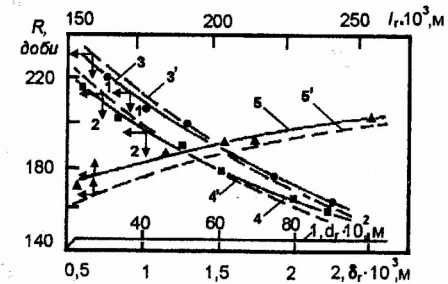


Рис. 15. Залежність ресурсу роботи кріопосуду з рідким азотом (R) від геометричних розмірів його горловини: 3...5 - експеримент; 3'...5' - теорія.

щиною $1,2 \cdot 10^{-3}$ м) і стовпа газу в невеликому зазорі ($2,5 \cdot 10^{-3}$ м) між горловиною та пробкою:

$$\frac{d}{dr} \left[\lambda_{\perp}(T_r) r^2 \frac{dT_r}{dr} \right] + \frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left[\lambda_{\parallel}(T_r) \sin \theta \frac{dT_r}{d\theta} \right] = 0, \quad (26)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left[\rho \lambda_{\rho}(T_p) \frac{dT_p}{d\rho} \right] + \frac{d}{dz} \left[\lambda_z(T_p) \frac{dT_p}{dz} \right] = 0, \quad (27)$$

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{\lambda_r(T_r) F_r + \lambda_{r,3}(T_{r,3})}{F_r + F_{r,3}} \frac{dT_r}{dx} \right] + \frac{c_p \cdot \dot{m}}{F_r + F_{r,3}} \frac{dT_r}{dx} = \frac{q_s(T_r, T_i) \cdot S}{F_r + F_{r,3}}, \quad (28)$$

де x, z, r, ρ, θ – координати вздовж вісі горловини і пробки, по товщині ЕВТІ і пробки, вздовж шарів ЕВТІ, відповідно; $\lambda_{\perp}, \lambda_{\parallel}$ – теплопровідність ЕВТІ в перпендикулярному і повздовжньому шарам ЕВТІ напрямках; $T_r, T_p, T_i, T_{r,3}$ – температура ізоляції, пробки, горловини і в газовому зазорі, відповідно; $F_r, F_{r,3}$ – площа поперечного перетину горловини і газового зазору; c_p – теплоємність парів кріоагенту; \dot{m} – витрати парів у кріопосуді; q_s – теплообмін між пакетом ЕВТІ і горловиною; S – площа бокової поверхні горловини.

Для нелінійних систем рівнянь (26)...(28) застосовувались граничні умови першого і другого роду на кордонах із зовнішнім середовищем і холодоагентом в посуді. На кордонах спряжених елементів теплозахисту враховувався радіаційно-кондуктивний теплопереніс між ними.

Проведена апробація даної методики на експериментальних результатах, отриманих на оптимізованих кріопосудах. Встановлено задовільне (з точністю 9...15 %) узгодження між розрахунковими та експериментальними результатами для



Рис. 16. Вдосконалені кріопосуди заводу ХЗТО: 1 - Х-34БМ, 2 - Х-16, 3 - Х-10, 4 - Х-5.

теплопритоків по всім конструктивним елементам (горловині, пробці, пакету ЕВТІ), температурних профілів вздовж шарів ЕВТІ, залежностей ресурсу роботи кріопосудів (R) від діаметра горловини R(d) 3, 3', її товщини R(δ) 4, 4' та довжини R(l) 5, 5', представлених на рис. 15. Це свідчить про можливість використання розробленої методики для теплових розрахунків та вдосконалення кріопосудів.

Розроблений вперше комплекс із усіх оптимізованих конструкцій та технологій та вибрані високоефективні сучасні

ізоляційні, адсорбційні та конструктивні матеріали впроваджені на заводі ХЗТО в серійне виробництво семи типів кріобіологічних посудів Х-34Б, Х-34БМ, ХТ-35, ХТ-35М, Х-16, Х-10 і Х-5 ємністю від 5 до 35 л (рис. 16). В результаті їх теплові характеристики стали кращими існуючих світових аналогів. У зв'язку з підвищенням якості кріопосудів завод отримав значний економічний ефект. Виготовлено вже понад 160 тисяч таких високоякісних кріопосудів, які експлуатуються в Україні, в країнах СНД, Фінляндії та інших.

В шостому розділі описано вперше розроблені методики експериментальних прискорених (в 60...120 разів) перевірок довготермінових (на строк експлуатації до 10 років і більше) характеристик та надійності основних конструктивних елементів, що використовуються в кріопосудах (адсорбційних насосів, пакетів ЕВТІ, ресурсу підтримки оптимального вакууму).

Встановлено, що при експлуатації кріопосуди зазнають значних динамічних навантажень. Це обумовлює в низькоякісних із них деформацію пакетів ЕВТІ вздовж горловини, утворення вугільного пилу у вакуумному насосі від стирання адсорбенту і потрапляння його в шари ЕВТІ. Характеристики таких кріопосудів погіршуються. Розроблена технологія проведення прискорених (за ~1,5 місяця) випробувань виготовлених кріопосудів. Вона складається в порівняльному визначенні ресурсу роботи з рідким азотом для тільки виготовленого кріопосуду (R_n) і після дії на нього 5000 ударних навантажень (R_k) на ударному стенді УУ500/150. Показано, що якщо ресурс роботи R_k зменшується після випробувань не більше, як на 5% в порівнянні з початковим R_n , то використовуємої в кріопосуді пакет ЕВТІ і адсорбційний насос являються оптимізованими.

В сьомому розділі наведені результати досліджень характеристик нових кріовакуумних та кріоадсорбційних пристроїв, розроблених на базі вдосконалених оптимізованих кріобіологічних посудин.

Запропоновано недорогий засіб виготовлення різноманітних високоефективних кріопристроїв (азотних пасток, вакуумних адсорбційних насосів і адсорберів) у вигляді окремих вставок (модулів). На рис. 17 представлена конструкція такого вставного кріовакуумного насоса 2, який через горловину 3 вводиться в кріопосуд 1 для охолодження його адсорбента (вугілля СКТ-4 або цеоліт масою 0,2...0,5 кг) рідким азотом. Для цих кріопристроїв досягнуто в 5...80 разів менші втрати рідких кріоагентів (в порівнянні з існуючими) внаслідок вдосконалення оптимізації їх конструкцій

по теплопритокам, а також охолодження в базових кріопосудах з ефективним тепло-

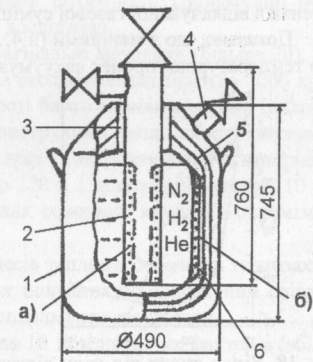


Рис. 17. Принципові схеми модульного вставного кріовакуумного адсорбційного насоса (а) та конденсаційно-адсорбційного вакуумного насоса-сепаратора (б): а) 1 – кріопосуд, 2 – кріовакуумний насос, 3 – горловина; б) 4 – штуцер відкачки, 5 – багатокранний пакет, 6 – елементи адсорбційного вакуумного насоса.

захистом.

Встановлено, що розміщений в міжстінній порожнині кріопосудів багатошаровий (до ~100 шарів) пакет із перфорованих екранів (металізованих острівцями Al нанорозмірної товщини (25...50 нм)) з малим перепадом температури (до ~3 К) між ними, представляє нову високоефективну систему для селективної відкачки і квазі-безперервного розділення газових сумішей на окремі компоненти по теплотах адсорбції (конденсації). В результаті усувається взаємний погіршуючий вплив різних молекул на процес адсорбції, що сприяє отриманню більш низького (на ~1,5 порядки) тиску в об'ємі в порівнянні з кріогенними вакуумними насосами.

Перевірена ефективність розробленого пристрою на різних системах, в тому числі на прикладі відкачки при температурі 4,2 К модельної складної газової суміші (близької за складом до продуктів термоядерної реакції) із He, H₂, D₂, N₂ та інших. Кінетика зміни тиску в камері при її вакуумуванні представлена залежністю P(τ_в) і (рис. 18). Ефект розділення газових сумішей при вакуумуванні підтверджується її аналізом при десорбції (шляхом нагрівання пакета від холодної стінки), що видно з рис. 19. Спочатку, на протязі ~2 хв., десорбується чистий He (який має найменшу теплоту адсорбції), потім на протязі ~2,5 хв. виділяється суміш He з H₂, далі – чистий H₂ і так далі. Останньою десорбується CO₂, яка характеризується найбільшою теплотою адсорбції. Встановлено, що при десорбції до 60...65 % об'єму кожної компоненти з відкачуваної газової суміші можливо виділити в чистому вигляді.

Показано, що з меншими (в 4...5 разів) енерговитратами (в порівнянні з гелієвою температурною) процес вакуумування та розділення дослідної складної газової

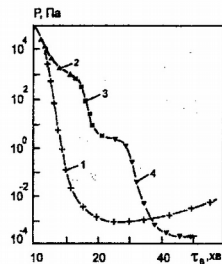


Рис. 18. Зміна тиску від часу відкачки газової суміші конденсаційно-адсорбційними вакуумними насосами-сепараторами, що охолоджуються: 1,4 – He, 2 – N₂, 3 – N₂.

суміші здійснюється розробленими пристроями при послідовній селективній її відкачці спочатку при азотній температурі (залежність P(τ_в) 2, рис. 18), потім при водневій – крива P(τ_в) 3) і в кінці – при температурі 4,2 К (залежність 4). В результаті досягається більш високий (на ~1 порядок) вакуум ~10⁻⁴ Па, який необхідно підтримувати в термоядерному реакторі (рис. 18). По механізму відкачки газової суміші розроблений вакуумний насос являється конденсаційно-адсорбційним. Крім того, за

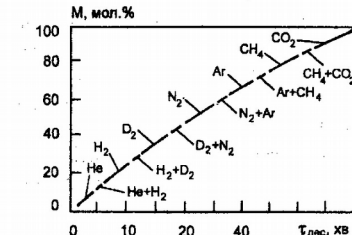


Рис. 19. Зміна складу десорбованої газової суміші від часу десорбції із конденсаційно-адсорбційного вакуумного насоса-сепаратора.

його допомогою досягається розділення відкаченої газової суміші та виділення частини її компонентів в чистому вигляді. Тому цей пристрій представляє новий конденсаційно-адсорбційний вакуумний насос-сепаратор. Його можна рекомендувати для використання в різних вакуумних технологіях та термоядерному реакторі. Параметри всіх розроблених пристроїв представлені в дисертації.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що вдосконалення характеристик низькоякісних кріопосудів (які виготовляли в нашій країні й за кордоном) можливо виконати лише методом рішення задачі оптимізації (із-за відсутності теоретичних і експериментальних методик). Цільовою функцією даної оптимізації для системи "кріопосуд – рідкий кріоагент" являється ресурс роботи кріопосуду (R) при разовому заповненні кріоагентом. Виявлено, що максимальне значення ресурсу (R_{max}) повинно обумовлюватися основними характеристиками: мінімальною теплопровідністю (λ_{эф.мін}) для теплозахисної ЕВТІ кріопосуду (близькою до калориметричних значень); максимальним використанням в них холоду парів (E_{х.макс}) для зменшення теплопритоків (близьким до теоретичних величин), та оптимальним вакуумом (P₀ ≤ 10⁻³ Па) в ЕВТІ протягом 10...15 років експлуатації. Оптимізуючі параметри для цих характеристик (які являються основними критеріями оптимізації кріопосудів) були невідомі. Їх треба було виявити із результатів досліджень.
2. Розроблені нові наукові підходи, створені оригінальні методики (більше 20), виготовлені необхідні установки і використані в експериментах близько 7000 кріопосудів, які дозволили вивчити нові особливості багатомірних процесів тепломасопереносу в спряжених багатоелементних конструкціях теплозахисту та газообміну в системі вільний об'єм – адсорбційний шар – газ, розчинений в матеріалі ЕВТІ кріопосудів при температурах від 4,2 до 120 К і довгострокових (до 10 років) процесах з метою визначення значень для основних критеріїв оптимізації кріопосудів λ_{эф.мін}, E_{х.макс} і P₀.
3. Встановлена двомірність та спряженість процесів тепломасообміну в теплозахисній конструкції кріопосуду. Показано, що їхнє описання по одномірним співвідношенням дає на 2...4 порядки відмінні від експерименту результати.
4. Виявлено в низькоякісних кріопосудах більше 10 погіршуючих факторів (збільшуючих чорноту екранних матеріалів до 10 разів, тиск газів на 2...4 порядки, щільність смуг в ЕВТІ в 3...4 рази та інші характеристики), які обумовлюють зростання молекулярного, радіаційного, контактано-кондуктивного теплопереносу і теплопровідності в 11-12,7 рази. Розроблені конструкції і технології, які реалізували значення встановлених 11 оптимізуючих параметрів для виготовлення кріопосудів без погіршуючих факторів та з мінімальною теплопровідністю λ_{эф.мін}.
5. Встановлено оптимізовані значення для 5 виявлених монтажних параметрів (зусиль натягу для смуг ЕВТІ (P_{з.н}), ширини їх розкрою на смуги (h_с) і інші), які визначають машинну технологію ізолювання кріопосудів різними матеріалами (у тому числі маломіцними (з σ_р < 3 кГ/мм²) із застосуванням штучних зарядів стателектрики величини Q = (6...8)·10⁻⁷ Кл/м²), при яких усуваються розбіжності (в 2...4 рази) теплопровідності λ_{эф} для змонтованих ЕВТІ та досягається їх відтво-

- рюваність (з точністю до 10...15 %), близькою до калориметричних значень.
6. Розроблені конструкції і технології вдосконалення, що реалізували значення комплексу з 9 виявлених оптимізуючих параметрів, які дозволили в криопосудах з рідкими N_2 , H_2 і He максимально використовувати холод парів криоагентів $E_{x,max}$ для зменшення в них сумарних теплопритоків, відповідно, в $\sim 1,6$, ~ 5 і ~ 40 разів.
 7. Виявлено, що в результаті спряженості процесів тепломасообміну в вузлі криопосуду пари криоагенту-горловина-торці теплозахисного пакету ЕВТІ, збільшення до максимального ступеня використання холоду парів криоагенту в теплоізоляції ($E_{x,max}$) обумовлює зростання до найбільшої величини коефіцієнту теплообміну з парами криоагенту всередині горловини ($\alpha_{л,max}$), а також зменшення температури недорекуперації на теплому кінці горловини до величини $< 0,6$ К.
 8. Встановлено експериментально існування (згідно теорії) 4 послідовно протікаючих режимів вакуумування $P(\tau_n)$ і газовідділення $W(\tau_n)$ для матеріалів: із вільного об'єму газу, десорбційного (з полішарів і моношару) та дифузійного. Розроблені експериментальні методи визначення границь між ними. Виявлено, що істинною вакуумною характеристикою матеріалу є величина його газовідділення в дифузійному режимі, яка не залежить від швидкості відкачки. Встановлено, що за 10 років вакуумування газівідділення з матеріалів не припиняється, а лише зменшується в 80...160 разів. Визначені за цей час сумарні об'єми продуктів газівідділення (V_{Σ}) з них, які необхідні для проектування адсорбційних вакуумних насосів для криосистем. Встановлено зменшення на 2...3 порядки інтенсивності газівідділення з матеріалів при досягненні дифузійного режиму, що дозволяє розробляти енергозберігаючі вакуумні технології, наприклад, сушіння та інші.
 9. Розроблена ефективна конструкція адсорбційного вакуумного насоса для криопосудів в результаті реалізації значень для комплексу з 8 виявлених параметрів для їх вдосконалення. Це дозволило усунути виникнення погіршуючих факторів та збільшити ресурс роботи криопосуду з оптимальним вакуумом P_0 в ~ 3 рази (до 60 місяців) у порівнянні з раніше використовуваною конструкцією.
 10. Встановлено взаємозв'язок між тепловими характеристиками пакетів ЕВТІ та вакуумними, адсорбційними й іншими параметрами використовуваних в них нових (більше 10) прокладкових матеріалів. Це дозволяє розробляти нові ефективні композиційні прокладки для пакетів ЕВТІ з наперед заданими властивостями. Розроблені нові прокладки АНТ-10 і УНТ-10, з якими для пакетів ЕВТІ на криопосудах отримані самі низькі теплопровідності $\lambda_{эф}$, рівні $(3,6...3,8) \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К), які в $\sim 10,5$ рази менші в порівнянні з ЕВТІ на низькоякісних криопосудах.
 11. Розроблено новий конденсаційно-адсорбційний вакуумний насос-сепаратор на базі міжстінної порожнини криопосуду і запропонованої багатошарової (до 100 шарів) системи із змінною температурою перфорованих екранів та мінімальним перепадом температури (до 3 К) між ними, що обумовлює розділення по її товщині відкачуваних газових сумішей на окремі компоненти (по теплотам адсорбції і конденсації) й дозволяє виділяти із неї до 65 % чистих компонентів при десорбції (нагріванням системи від холодної стінки за розробленою температурно-часовою програмою). Даний пристрій дозволяє отримувати більш високий (на $\sim 1,5$ порядки) вакуум у відкачуємому об'ємі в порівнянні з криогенними вакуумними насосами, уловлювати ароматичні речовини і вітаміни при субліма-

- ційній сушці й екстрагуванні. Його можливо також використовувати в деяких випадках замість малопродуктивного мембранного способу розділення газів.
12. Розроблена енергозберігаюча (в 4-5 разів) технологія селективного ступеневого вакуумування модельної газової суміші з He , H_2 , D_2 , N_2 (і інших компонентів), близької до утворюємої в термоядерному реакторі, з використанням спочатку розробленого конденсаційно-адсорбційного вакуумного насоса-сепаратора, охолодженого рідким N_2 , потім –скрапленням H_2 і наприкінці – рідким He , що дозволяє отримувати необхідний вакуум 10^{-4} Па, а також виділяти при десорбції D_2 для повернення в термоядерний реактор. Ця технологія являється набагато простішою в порівнянні з запропонованою із використанням багатьох пасток, різних криогенних, адсорбційних і інших вакуумних насосів.
 13. Дороблена і доведена до практичного використання відома теорія вакуумування і газівідділення матеріалів шляхом одержання додаткових співвідношень і визначення із розроблених експериментальних методик більше 15 її невідомих параметрів (часу життя молекул в адсорбованому стані (τ_a), коефіцієнтів дифузії (D_T) і інших). Встановлено задовільне узгодження (з точністю 12...14 %) між теоретичними й експериментальними залежностями тиску $P(\tau_n)$ і газівідділення $W(\tau_n)$ для матеріалів в дифузійному і десорбційному режимах в діапазоні 294...420 К і 350...420 К, відповідно. Запропоновано для поліпшення погодження між теорією і експериментом для моношару при 294...350 К врахувати енергетичну неоднорідність поверхні і її вплив на час життя молекул τ_a в моношарі.
 14. Виявлені особливості фізичних процесів (за доробленою теорією вакуумування) на поверхні та в структурі вакуумуємих ізоляційних матеріалів. Вони дозволили обґрунтувати (в результаті) прискорену (в ~ 3 рази) технологію відкачки криопосудів шляхом використання в їх ЕВТІ матеріалів, на яких адсорбовані молекули H_2O замінюються на молекули N_2 з меншою величиною й теплоото адсорбції. Розроблені також методики для визначення питомих поверхонь (S_n) матеріалів по ємності молекул H_2O в їх моношару (α_n) та одержання ізотерм адсорбції для різних газів $\alpha(P)$, більш дешеві і швидші (в 5...7 разів) за традиційні, широко використовувемі в сучасних хімічних та інших технологіях.
 15. Доведена до практичного застосування відома методика теплового розрахунку криопосудів шляхом експериментального дослідження для неї за розробленими методиками температурних залежностей коефіцієнтів теплопровідності $\lambda_{ЕВТІ}(T)$ для ЕВТІ та коефіцієнтів теплообміну $\alpha_n(T)$ в горловині з парами криоагенту на вдосконалених криопосудах. Проведена апробація і встановлене задовільне узгодження (з точністю 9...15 %) між теоретичними й експериментальними величинами для теплопритоків по всім конструктивним елементам, для залежностей ресурсу криопосуду від геометричних розмірів горловини й інших. Дороблена методика використовувалась при оптимізації криопосудів, а також у ФТІНТ НАНУ (м. Харків) для проектування різних криостатів та відсіків космічних апаратів.
 16. Вибрані та виготовлені найбільш ефективні сучасні матеріали для теплозахисних конструкцій з ЕВТІ, вивчені їх вакуумні, адсорбційні, газодинамічні й інші характеристики. Розроблені всі конструкції (більше 10) і технології (понад 10), які реалізували значення для виявленого комплексу з 30 оптимізуючих параметрів, необхідних для проектування і виготовлення різних криопосудів і криосистем на те-

- мпературний рівень від 4,2 до 120 К і термін експлуатації 10...15 років з основними характеристиками $\lambda_{\text{эф.мін}}$, $E_{\text{к.макс}}$ і P_0 та ресурсом роботи $R_{\text{макс}}$, більшим закордонних аналогів. В вітчизняній і закордонній літературі такі дані відсутні.
17. Розроблені нові різні кріопристрої (пастки, вакуумні адсорбційні насоси, адсорбери) у вигляді вставок (модулів) для охолодження всередині вдосконалених широкогорлових кріобіологічних посудів Х-34Б і ХТ-35 (ємністю 35 л) з безперервною роботою на одній заправці рідким N_2 на протязі 3...6 місяців і його втратами в 6...30 разів меншими в порівнянні з аналогами для здійснення енергозберігаючих процесів вакуумування і розділення газів.
18. Впроваджено на заводі ХЗТО розроблений комплекс із удосконалених конструкцій і технологій, а також вибрані найбільш ефективні сучасні ізоляційні, адсорбційні та конструктивні матеріали в виробництво 7 типів серійних кріобіологічних посудів Х-34Б, ХТ-35 і інших (ємністю від 5 до 35 л), що дозволило довести їхні теплові параметри до кращих у світі. Досягнуто, наприклад, для кріопосуду Х-34Б (35 л) зростання ресурсу роботи $R_{\text{макс}}$ з рідким N_2 з 100...110 до 390...400 діб (в $\sim 3,6$ рази), який в 1,6 рази вищий кращого французького кріопосуду RSV-35А. Від покращення параметрів кріопосудів на заводі отриманий економічний ефект (більше 700 тис. крб. в цінах 1991 р.). Виготовлено на теперішній час вже понад 160 тис. таких ефективних кріопосудів, які використовуються в Україні, Росії, Фінляндії та інших країнах у тваринництві, кріомедицині, кріобіології, ракетно-космічному комплексі, наукових дослідженнях. Використання цих кріопосудів (замість низькоякісних) дає щорічно до 6...8 млн. грн. економічного ефекту в народному господарстві України.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Жунь Г.Г. Выбор оптимальной теплозащитной композиции для криобиологических сосудов / Г.Г. Жунь, В.И. Шалаев, В.О Джанашвили // Холодильная техника и технология. – К.: Техніка. 1985. – Вып. 41. – С.45-51. *Здобувач запропонував метод підвищення ефективності ЕВТІ в кріопосуді.*
2. Жунь Г.Г. Исследование влияния конструкции пробки на ресурс криобиологического сосуда / Г.Г. Жунь, В.И. Шалаев, В.О Джанашвили // Холодильная техника и технология. К.: Техніка. – 1986. – Вып. 42. – С.50-55. *Здобувач запропонував ефективну конструкцію пробки для кріопосуду.*
3. Жунь Г.Г. Эффективность "безэкранного" метода использования холода паров в криососудах с широкой горловиной / Г.Г. Жунь, В.Ф. Гетманец, Р.С. Михальченко [и др.] // Инж.-физ. журн. – 1988. – Т.54, №4. – С.600-607. *Здобувач запропонував методику вивчення ефективності використання холоду парів кріоагенту.*
4. Жунь Г.Г. Выбор и реализация путей снижения теплопритоков в криососудах с жидким азотом / Р.С. Михальченко, В.Ф. Гетманец, Г.Г. Жунь [и др.] // Инж.-физ. журн. – 1989. – Т.57, №1. – С.95-100. *Запропонував вивчення параметрів для нових ЕВТІ.*
5. Жунь Г.Г. Исследование эффективности теплозащиты промышленных криососудов с жидким N_2 и H_2 / Г.Г. Жунь, В.Ф. Гетманец, П.Н. Юрченко [и др.] // Инж.-физ. журн. – 1989. – Т.57, №3. – С.478-480. *Здобувач запропонував вивчити ефекти-*

- вність використання холоду парів N_2 і H_2 в кріопосуді.*
6. Жунь Г.Г. Выявление и устранение факторов, ухудшающих эффективность криососудов / Г.Г. Жунь, В.Ф. Гетманец, В.А. Мирошниченко [и др.] // Инж.-физ. журн. – 1989. – Т.56, №2. – С.271-276. *Запропонував вивчити погіршуючі фактори в ЕВТІ.*
 7. Жунь Г.Г. Теплообмен в азотных криососудах с широкой горловиной / Г.Г. Жунь, В.Ф. Гетманец, П.Н. Юрченко [и др.] // Инж.-физ. журн. – 1988. – Т.55, №3. – С.502. *Здобувач запропонував метод вивчення теплообміну з парами в горловині кріопосуду.*
 8. Zhun' G.G. High efficiency small cryovessels / G.G. Zhun', V.F. Getmanets, R.S. Michalchenko [and others] // Cryogenics. 1992. – Vol.32. – P.173-174. *Здобувач запропонував вивчити залежність теплових параметрів від монтажних характеристик в кріопосуді.*
 9. Жунь Г.Г. Повышение эффективности промышленных криососудов / Г.Г. Жунь // Придніпровський науковий вісник. Сер.: "Машинобудування". – 1998. – №28(95). – С.30-40.
 10. Жунь Г.Г. Разработка эффективных конденсационных, адсорбционных и конденсационно-адсорбционных криоустройств для вакуумирования и сепарации / Г.Г. Жунь // Придніпровський науковий вісник. Сер.: "Машинобудування". – 1998. – №54(121). – С.5-20.
 11. Жунь Г.Г. Неизотермический конденсационно-адсорбционный насос для откачки и разделения газовых смесей / Г.Г. Жунь // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 1998. – Вып.1(2). – С.14-21.
 12. Жунь Г.Г. Исследование десорбционно-диффузионных процессов вакуумирования и газоотделения материалов / Г.Г. Жунь // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 1998. – Вып.1(2). – С.22-30.
 13. Жунь Г.Г. Разработка оптимальной технологии вакуумирования криососудов / Г.Г. Жунь // Придніпровський науковий вісник. Сер.: "Машинобудування". – 1998. – №43(110). – С.43-51.
 14. Жунь Г.Г. Исследование адсорбционных характеристик изоляционных материалов десорбционным методом / Г.Г. Жунь // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 1998. – Вып.1(2). – С.31-36.
 15. Жунь Г.Г. Оптимизация технологии монтажа теплоизоляционных слоев ЕВТІ криососудов / Г.Г. Жунь // Придніпровський науковий вісник. Сер.: "Машинобудування". – 1998. – №28(95). – С.30-40.
 16. Жунь Г.Г. Исследование пропускной способности экранно-вакуумных изоляций / Г.Г. Жунь // Придніпровський науковий вісник. Сер.: "Машинобудування". – 1998. – №54(121). – С.20-28.
 17. Zhun' G.G. The single component superinsulation / V.F. Getmanets, L.G. Goncharenko, G.G. Zhun' [and others] // Cryogenics. – 1999. – N 39. – P. 1037-1038. *Здобувач запропонував вивчити ефективність пукльованого екранного матеріалу в пакетах ЕВТІ.*
 18. Zhun' G.G. A shieldless method for cryogenic cold-vapor supply usage: Theory and practice / V.F. Getmanets, R.S. Michalchenko, G.G. Zhun' [and others] // Cryogenics. – 1999. – N 39. – P. 985-987. *Запропонував метод підвищення охолоджуючого ефекту*

парів.

19. Жунь Г.Г. Разработка высокоэффективной комбинированной композиции ЕВТИ / Г.Г. Жунь // Вестник ХГПУ. – 2000. – Вып. 106. – С. 75-79.
20. Жунь Г.Г. Разработка и исследование энергосберегающих адсорбционных насосов для криососудов / Г.Г. Жунь // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2000. – №4. – С. 17-25.
21. Жунь Г.Г. Исследование влияния конструкции теплозащиты горловины на эффективность криососуда / Г.Г. Жунь // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2001. – №1. – С. 26-29.
22. Жунь Г.Г. Исследование многолетнего процесса газоотделения изоляционных материалов в вакууме / Г.Г. Жунь // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2001. – №2. – С. 15-19.
23. Жунь Г.Г. Ускоренное исследование воздействия эксплуатационных нагрузок на испаряемость из криососудов / Г.Г. Жунь // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2001. – №3. – С. 13-17.
24. Жунь Г.Г. Новые подходы к описанию процессов вакуумирования и газоотделения / Г.Г. Жунь, В.Ф. Гетманец // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2002. – Вып.1(12). – С. 67-71. *Здобувач запропонував метод визначення параметрів з дослідних даних по газовідділенню.*
25. Жунь Г.Г. Устройство для селективного вакуумирования и разделения сложных газовых смесей и изотопов / Г.Г. Жунь // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2001. – №4. – С. 17-21.
26. Жунь Г.Г. Разработка эффективного адсорбционно-десорбционного способа разделения газовых смесей / Г.Г. Жунь // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2002. – №1. – С. 22-29.
27. Жунь Г.Г. Разработка высокоэффективных промышленных криососудов и энергосберегающих криоустройств и технологий на их основе / Г.Г. Жунь // Холодильная техника и технология. – 2003. – №5. – С. 33-39.
28. Жунь Г.Г. Исследование теплофизических параметров криобиологических сосудов "Харьков-34Б" / Г.Г. Жунь, А.Г. Подольский, В.И. Шалаев // Криогенные системы: разработки и исследования. - К.: Наук. думка. – 1984. – С.35-42. *Здобувач запропонував методику вивчення теплопритоків по тепловим мостам криососуду.*
29. Жунь Г.Г. Криобиологические сосуды с улучшенными тепловыми характеристиками / Г.Г. Жунь, А.Г. Подольский, В.И. Шалаев [и др.] // Межвузовский сборник научн. трудов. Процессы и аппараты криогенной технологии и кондиционирования. Л.: ЛТИ им. Ленсовета. – 1985. – С.59-64. *Здобувач запропонував методику прискорення процесу вакуумування криососуду.*
30. Жунь Г.Г. О зависимости тепловых характеристик криососудов от температуры процесса вакуумной дегазации их изоляционных материалов / Г.Г. Жунь, В.И. Шалаев // Межвузовский сборн. научн. трудов: Исследование теплофизических свойств рабочих тел и процессов криогенной техники и кондиционирования воздуха. Л.: ЛТИ им. Ленсовета. – 1986. – С.9-13. *Здобувач запропонував вивчити вплив температури дегазації на теплові характеристики криососуду.*
31. Жунь Г.Г. О влиянии условий вакуумирования теплоизоляции на ресурс работы криососуда / Г.Г. Жунь, А.Г. Подольский, В.А. Мирошниченко // Межвузовский

- сборн. научн. трудов: Исследование теплофизических свойств рабочих тел и процессов криогенной техники и кондиционирования воздуха. Л.: ЛТИ им. Ленсовета. – 1987. – С.39-45. *Запропонована методика покращання відкачки криососуду.*
32. Жунь Г.Г. Оптимизация процесса термовакuumной дегазации теплозащиты криососудов / Г.Г. Жунь // Авіаційно-космічна техніка та технологія. 36. наук. праць. Харків: Нац. аерокосмічний університет "ХАІ". – 2001. – Вып. 21. – С. 104-107.
33. Жунь Г.Г. Исследование распределения давления в теплоизоляции криососуда / Г.Г. Жунь // Авіаційно-космічна техніка та технологія. 36. наук. праць. Харків: Нац. аерокосмічний університет "ХАІ". – 2002. – Вып. 27. – С. 94-98.
34. Жунь Г.Г. Ускоренное определение ресурса работы криососуда с оптимальным вакуумом / Г.Г. Жунь // Міжвуз. зб. наук. праць. Хар. АЗТ. – 2001. – Вып. 45. – С.100-104.
35. Жунь Г.Г. Выбор и реализация путей повышения ресурса криососудов с жидким азотом / Г. Жунь, В. Гетманец, Р. Михальченко [и др.] // Труды 9-ой Международной конф. (Kryogenika – 88). Usti nad Labem. CSVTS. – 1988. – С.189-196. *Здобувач запропонував вивчити залежності параметрів криососуду від холоду парів криоагентів.*
36. Жунь Г.Г. Эффективность новых теплоизоляций в криогенных сосудах небольших размеров / Р. Михальченко, В. Гетманец, Г. Жунь [и др.] // Труды 9-ой Международной конф. (Kryogenika – 88). Usti nad Labem. CSVTS. – 1988. – С.156-161. *Здобувач запропонував вивчити ефективність ЕВТИ на криососуді з новими матеріалами.*
37. Жунь Г.Г. Разработка и исследование новых ЭВТИ и их применение в немагнитных криостатах / Т. Анникова, В. Гетманец, Г. Жунь [и др.] // Труды 1-й Международ. конф. по технике низких температур (Kryogenika-90). 15-18 may 1990. Kosice. CSVTS. – 1990. – С.234-235. *Запропоновано вивчити машинне ізолювання ЕВТИ.*
38. Жунь Г.Г. Исследование влияния эксплуатационных факторов на эффективность криогенных систем / Г. Жунь, В. Гетманец, Р. Михальченко [и др.] // Труды 1-й Международ. конф. по технике низких температур (Kryogenika-90). Kosice. CSVTS. – 1990. – С.241-242. *Запропоновано вивчити ефективність теплообміну в ЕВТИ.*
39. Жунь Г.Г. Исследование теплообмена и вопросы повышения ресурса криобиологических сосудов "Харьков-34Б" / Г.Г. Жунь, В.И. Шалаев // Труды III Всесоюзн. научн.-техн. конф. по криогенной технике "Криогенная техника-82" (Балашиха, 1982). М.: ЦИНТИхимнефтемаш. – 1982. – С.26. *Здобувач запропонував метод вивчення ефективності ЕВТИ по особливостям їх температурних профілів.*
40. Жунь Г.Г. Исследование многолетнего воздействия на материалы и характеристики криососудов вакуума, низких температур и перегрузок / Г.Г. Жунь, В.Ф. Гетманец, Р.С. Михальченко [и др.] // Труды Междунар. научн.-практ. конф. "Криогенная техника – науке и производству". М.: ЦИНТИхимнефтемаш. – 1991. – С.97. *Здобувач запропонував вивчити вплив на теплові характеристики ЕВТИ різних параметрів.*
41. Zhun' G.G. Cryocooler Working Medium influence on outgassing Rate / V.F. Getmanets, G.G. Zhun' // Proceeding of 10th International Cryocooler Conference. Monterey. California. USA. – 1999. – P. 123-129. *Здобувач запропонував необхідність вивчення газовідділення в продувочні газу.*

42. Zhun' G.G. Accelerated Cryocooler Lifetime Test for Cryodeposit Foilures / V.F. Getmanets, G.G. Zhun', H. Stears // Proceeding of 10th International Cryocooler Conference. Monterey, California, USA: –1999. – P. 215-219. *Здобувач запропонував прискорений метод визначення ресурсу роботи криопосуду з оптимальним тиском.*
43. Жунь Г.Г. Криососуды, криовакуумные и криоадсорбционные устройства для хранения криоагентов и осуществления технологий с рекордно низкой испаряемостью / Г.Г. Жунь // сб. науч. трудов 2-й Междунар. научно-технической конф. "Современные проблемы холодильной техники и технологии". Одесса, ОГАХ. 2002. - С. 169-174.
44. А.с. 994861 СССР, МКИФ 17С3/04. Сосуд криобиологический / В.И. Морозов, В.И.Шалаев, Г.Г. Жунь [и др.] (СССР) – № 3328714/23; заявл. 05.08.81; опубл. 07.02.83. Бюл. №5. – 2 с. *Здобувач запропонував метод ізолювання криопосудів.*
45. А.с. 1536156 СССР, А1(51)F16L59/06. Теплозащитное покрытие криогенных трубопроводов / В.Ф. Гетманец, Р.С. Михальченко, Г.Г. Жунь [и др.] (СССР) – №4422895/25-29. заявл. 15.03.1988 г.; опубл. 15.01.90, Бюл. №2 – 2 с. *Здобувач провів дослідження конструкцій теплозахисту криотрубопроводів.*
46. Жунь Г.Г. Исследование особенностей тепло-массообменных процессов в теплозащите криососудов для улучшения ее характеристик / Г.Г. Жунь // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков.: ХАИ.–2007.–Вып.1 (37). – С. 29-33.
47. Жунь Г.Г. Оптимизация теплозащиты криососуда / Г.Г. Жунь // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков.: ХАИ. – 2007. – Вып.5 (41).– С. 29-33.
48. Жунь Г.Г. Оптимизация многоэлементных теплозащитных конструкций криососудов / Г.Г. Жунь // Технические газы. – 2008. – №1. – С. 23-33.

АНОТАЦІЇ

Жунь Г.Г. Науково-технічні засади створення високоефективних промислових криопосудів і енергозберігаючих пристроїв і технологій на їх основі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – "Холодильна, вакуумна і компресорна техніка, системи кондиціонування". – Одеська державна академія холоду, м. Одеса, 2010.

Дисертація присвячена вперше отриманому вирішенню важливої народногосподарчої проблеми для тваринництва, кріомедицини та кріогенної техніки України – розробці методів удосконалення низькоякісних кріобіологічних (та інших) криопосудів з теплозахистом із пакетів ЕВТІ, виготовляємих на заводах країни (і за кордоном) до теплових, вакуумних та інших характеристик, близьких до граничних розрахункових.

Запропоновано покращення характеристик криопосудів виконати методом оптимізації їх конструктивних елементів. Виявлені значення для всього комплексу із 30 параметрів із результатів розрахункових, теоретичних і експериментальних досліджень нових особливостей тепломасообмінних багатомірних процесів в багатоелементній спряженій конструкції теплозахисту з пакетами ЕВТІ на криопосудах за розробленими новими методиками на виготовлених установках і більше 7000 криопосудах при температурах від 4,2 до 420 К і довготривалих (на протязі до 10 років) процесах.

Розроблені всі конструкції (більше 10) і технології (понад 10) для реалізації значень виявлених оптимізуючих параметрів, що дозволило вдосконалити криопосуд з теплозахистом із ЕВТІ до рекордних теплових і вакуумних характеристик.

Розроблено новий конденсаційно-адсорбційний вакуумний насос-сепаратор для ефективної відкачки газових сумішей і розділення їх на окремі чисті (до 65 %) компоненти (в тому числі складної, яка утворюється в термоядерному реакторі).

Впроваджені на заводі ХЗТО розроблені вдосконалені конструкції і технології в серійне виробництво 7 типів кріобіологічних посудів (місткістю від 5 до 35 л), що дозволило довести їх характеристики до кращих від світових аналогів. Отриманий на заводі економічний ефект (більше 700 тис. крб. в цінах 1991 р.) від покращання параметрів криопосудів. На даний час виготовлено вже більше 160 тис. таких високоякісних криопосудів, які експлуатуються в Україні, Росії, Фінляндії та інших країнах в тваринництві, кріомедицині, кріобіології, ракетно-космічному комплексі, дослідженнях. Від використання даних криопосудів (замість низькоякісних) в Україні одержується щорічно до 6...8 млн. грн. економічного ефекту.

Основні результати дослідження використовуються в учбовому процесі.

Ключові слова: криопосуд, теплоізоляція, пакет ЕВТІ, теплопровідність, тепломасообмін, вакуумування, газовідділення.

Жунь Г.Г. Научно-технические основы создания высокоэффективных промышленных криососудов и энергосберегающих устройств и технологий на их основе. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.14 – "Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования". – Одесская государственная академия холода, г. Одесса, 2010.

Диссертация посвящена впервые полученному решению важной народнохозяйственной проблемы для животноводства, кріомедицины и кріогенной техники Украины – разработке методов совершенствования низкокачественных кріобіологіческих (и других) криососудов с теплоизоляцией из пакетов ЭВТИ, изготовляемых на заводах страны (и за рубежом), до тепловых, вакуумных и других характеристик, близких к предельным расчетным.

Предложено улучшение характеристик криососудов выполнить методом оптимизации конструктивных элементов. Определены значения для всего комплекса из 30 выявленных оптимизирующих параметров из результатов исследования новых особенностей многомерных процессов тепломассообмена в многоэлементной сопряженной теплозащитной конструкции с ЭВТИ на криососудах. Проведены исследования по завершённым теориям и разработанным оригинальным методикам (свыше 20) на изготовленных установках и более 7000 криососудах при температурах от 4,2 до 420 К и длительных (в том числе многолетних) процессах.

Разработаны все конструкции (свыше 10) и технологии (более 10) для реализации значений для комплекса выявленных оптимизирующих параметров в криососудах, позволивших: упростить образование 13 установленных ухудшающих факторов и понизить теплопроводность ЭВТИ в ~9,5...10,4 раза; повысить степень использования холода паров (с ~19 %) до максимальной (98 %) и уменьшить теплопритоки в криососудах с жидкими N₂, H₂ и He в ~1,6, ~5 и ~40 раз, соответственно; разрабо-

тать новый адсорбционный вакуумный насос с увеличенным до ~60 месяцев (в ~3 раза) ресурсом поддержания оптимального вакуума ($P_0 \leq 10^{-3}$ Па) в криососуде и усовершенствовать другие конструкции и процессы.

Доведены до практического применения нерабочие теории процесса вакуумирования и газоотделения материалов, а также теплового расчета криососудов путем получения дополнительных соотношений и определения по разработанным экспериментальным методикам более 15 их неизвестных параметров и зависимостей. Проведена апробация теорий и выявлено удовлетворительное (до 10...15 %) согласие между теорией и экспериментом. Установлены с помощью развитой теории вакуумирования новые особенности физических процессов на поверхности и в структуре вакуумируемых материалов, позволивших обосновать ускоренную (в ~3 раза) технологию откачки криососудов.

Разработан новый конденсационно-адсорбционный вакуумный насос-сепаратор (на базе межстенной полости криососуда и предложенной многослойной (до 100 слоев) системы из прокладок и перфорированных экранов) для откачки и разделения (при десорбции) откачанной смеси на отдельные чистые (до 65 %) компоненты. Установлена эффективность ступенчатой селективной откачки разработанным устройством (при температурах 78, 20,4 и 4,2 К) сложной модельной газовой смеси из He, H₂, D₂, N₂ (и других компонентов), близкой к образующейся в термоядерном реакторе, и разделения ее (с выделением D₂ для возвращения в термоядерную "топку"). Выявленные характеристики нового вакуумного насоса позволяют рекомендовать его для использования в термоядерном реакторе, для улавливания ароматических веществ и витаминов при вакуумной сушке и других энергосберегающих технологиях.

Внедрены на заводе ХЗТО разработанные оптимизированные конструкции и технологии и выбранные современные наиболее эффективные материалы в производство 7 серийных криобиологических сосудов типа ХЗ4Б, ХТ-35 и других (емкостью от 5 до 35 л), что позволило довести их тепловые характеристики до лучших в мире. Получен на заводе экономический эффект (более 700 тыс. рубл. в ценах 1991 г.) от улучшения параметров криососудов. Изготовлено к настоящему времени более 160 тыс. таких высокоэффективных криососудов, которые применяются в Украине, России, Финляндии и других странах в животноводстве, криомедицине, криобиологии, в ракетно-космическом комплексе, исследованиях.

Основные результаты исследований используются в учебном процессе.

Ключевые слова: криососуд, теплоизоляция, пакет ЭВТИ, теплопроводность, тепломассоперенос, вакуумирование, газоотделение.

Zhun' G.G. Scientific and technological bases for industrial high-efficiency cryogenic vessel and power-saving devices and technologies based on this principle. – Manuscript.

Thesis for a Doctor's degree in Engineering Sciences by specialty 05.05.14 – "Refrigeration, vacuum and compressor engineering, conditioning systems". – State Academy of Refrigeration, Odessa, 2010.

The Dissertation is devoted to a novel original solution of a problem that is of paramount importance to the national economy of Ukraine, in particular cattle breeding,

cryobiology and cryoengineering. The approach proposed is concerned with the development of a set of scientifically substantiated devices and technologies applicable in designing, optimization and industrial production of cryobiological (and other) cryovessels for which a special mechanical-aided technique of insulation with multilayer thermoinsulating packets has been developed. Such cryovessels can be a basis for cryogenic units operating in the methane – helium interval of temperatures and thermal current, vacuum and other characteristics closely approaching the ultimate theoretical parameters.

To achieve the goals formulated in the Dissertation, experimental research was performed that revealed fundamentally new regularities for complex two-dimensional adjoint heat-mass transfer exchange processes between the heat-shielding structural elements on poor-quality cryovessels. The reasons for the low efficiency of such cryostats have been cleared up and the ways of their optimization proposed.

The basic results have been implemented in full-scale production (Kharkov Plant Transport Equipment) of seven types of cryobiological 5 to 35 liter vessels with characteristics upgraded to the world-best standards. From improvement of parameters cryovessels at a factory significant income is obtained. By now the Plant has produced over 160,000 high-efficiency cryovessels that are widely used in Ukraine, the CIS countries, Hungary, Finland and others.

The basic results have been used in educational programs.

Keywords: cryovessel, thermal insulation, multilayer thermoinsulation packet, heat-mass transfer, evacuation, gas separation.