

Авторефер
Р62

Н

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

На правах рукопису

РОЖЕНЦЕВ Андрій В'ячеславович

КАПЛЯРНО-ПОРИСТІ СТРУКТУРИ В ТВЕРДИХ ХО-
ЛОДОАГЕНТАХ: УМОВИ УТВОРЕННЯ, ТЕПЛОФІЗИЧ-
НІ ВЛАСТИВОСТІ, ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ,
СУБЛІМАЦІЙНІ ОХОЛОДЖУВАЧІ НА ЇХНІЙ ОСНОВІ

Спеціальність 05.04.03 - холодильна та кріогенна
техніка, системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 1998

Робота виконана в Одеській державній академії холоду

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Смірнов Генріх Федорович, Одеська державна академія холоду,
Завідуючий кафедрою систем терморегулювання

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Загоруйко Василь Онисимович,
Одеський державний морський університет, професор кафедри суднового
енергетичного устаткування та технічної експлуатації флоту

доктор технічних наук, професор Спокійний Юрій Ефимович,
Одеський політехнічний університет, професор кафедри конструювання та
виробництва радіоелектронної апаратури

доктор технічних наук, професор Тимошевський Борис Георгійович,
Миколаївський державний морський технічний університет, професор
кафедри суднових енергетичних установок

Провідна установа – науково-виробниче об'єднання "Шторм",
Міністерство промислової політики України

Захист відбудеться «11» *серпня* 1998 г. у 11 год. на засіданні спеціалізованої
ради Д.05.20.01 при Одеській державній академії холоду (за адресою: 270026, Одеса,
вул. Дворянська, 1/3).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотечі ОДАХ.

розісланий «5» *травня* 1998 р.

Р. К. Нікульшин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

3

Актуальність проблеми. В свій час Карно встановив, що ККД ідеальної теплової машини не залежить від властивостей робочого тіла. Однак, наступні дослідження показали, що як принципові схеми реальних машин так і їхня енергетична ефективність в значній мірі залежать від цих властивостей. В пропонуємії дисертації основна увага приділяється проблемі використання утворюючихся в контурі машини твердих робочих тіл, вивченню їх теплофізичних властивостей і, зокрема, доводиться, що шляхом активізації процесів утворення і забезпечення тривалого існування особливої форми капілярно-пористої структури в твердій фазі можливо створення холодильних і криогенних машин безперервної дії, в контурі яких робоче тіло зазнає фазових перетворень «пар - рідина - тверде тіло - пар». Раніше це не допускалось і вважалося, що поява твердої фази веде до припинення циркуляції і зупинки машини. Останнє накладало істотне обмеження на вибір робочого тіла, температурні рівні, енергетичну ефективність і інші теплотехнічні характеристики холодильних і криогенних машин.

Таким чином, актуальність розглянутої проблеми визначається тим, що її рішення дозволяє створити нову генерацію машин, в яких допускається перехід робочого тіла в твердий стан, а також дозволяє поширити число використовуваних робочих тіл.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційна робота виконана згідно плану держбюджетних НДР Міністерства Освіти України на 1997-1999 рр., шифр НДР: ВІК-97/3, назва - «Дослідження умов утворення рухомих капілярно-пористих структур в твердих холодоагентах, їх термодинамічних і теплофізичних властивостей» (Наказ Міністерства Освіти України від 13.02. 97., №37).

Робота також в свій час виконувалася в відповідності з розпорядженням Президії АН СРСР на 1988 р. в рамках НДР «Квант», держ. рег. № 01880071450, назва - «Розробка і дослідження охолоджувачів ФЕМ і матриць ПЗЗ».

Мета і задачі дослідження. Метою пропонуємого дослідження є розробка нового наукового напрямку в галузі холодильної і криогенної техніки, пов'язаного з створенням сублімаційних холодильних машин, в контурі яких робоче тіло може переходити в твердий стан в вигляді особливої динамічної капілярно-пористої структури.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- використовуючи двоокис вуглецю CO_2 як робоче тіло, теоретично і експериментально дослідити умови і процеси виникнення і тривалого існування в контурі холодильної машини твердої фази холодоагенту з динамічною капілярно-пористою структурою (КПС), вивчити її специфічні особливості, теплофізичні властивості, процеси тепломасопереносу, що відбуваються в ній;
- визначити характер взаємодії і взаємовпливу структури і проходячих крізь неї теплових потоків;
- розробити конструктивні елементи холодильних і криогенних машин, що забезпечують виникнення і існування пористої твердої фази без порушення циркуляції, а також реалізують її багатofункціональні можливості;

XV1309

ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ

- виготовити і дослідити експериментальні зразки, визначити раціональні області застосування холодильних машин, працюючих з твердим холодоагентом.

Наукові положення, доказані в роботі.

1. Виявлений в контурі холодильної машини ефект утворення пористої структури твердого холодоагенту, супроводжуємім процесами кристалізації і сублімації на її межах, і визначення умов тривалого існування структури, дозволяють зняти обмеження на виникнення твердої фази і створити безупинно діючі машини, в яких робоче тіло здійснює фазові переходи «пар - рідина - тверде тіло - пар».
2. При теоретичному аналізі процесів структуроутворення і дослідженні тепломасопереносу капілярно-пористу структуру твердого холодоагенту доцільно представити в вигляді множини розташованих в твердому скелеті незалежних мікрокапілярів, які можуть розглядатися як відкриті теплові труби з зосередженими і розподіленими джерелами і стоками тепла і маси, що функціонують в зонах дроселювання, випаровування, конвективного переносу і десублімації.
3. Структура і теплофізичні параметри капілярно-пористого твердого холодоагенту мають властивості до самоорганізації та саморегулювання, які проявляються в тому, що структура самостійно призводить у відповідність теплове навантаження, потік маси і геометричні параметри блоку твердого холодоагенту.
4. Інтенсивний тепломасоперенос в рухомій капілярно-пористій структурі твердого холодоагенту забезпечує високі значення її ефективної теплопровідності.
5. Багатофункціональний характер капілярно-пористої структури твердого холодоагенту дозволяє в одному конструктивному вузлі вирішити задачі розподілу порожнин високого і низького тиску, створення ефективного рекуперативного теплообмінника, регулюємого дроселя і теплообмінника навантаження.

Наукова новина і наукові результати.

1. Вперше отримані експериментальні дані, що дозволили встановити основні якісні закономірності процесів виникнення і тривалого існування твердої фази робочого тіла на газопроникливій поверхні, розташованій в контурі холодильної машини.
2. Розроблена теорія процесів утворення і існування рухомої капілярно-пористої структури твердого холодоагенту в контурі холодильної машини.
3. Виявлені нові закономірності зміни структури, геометрії і ефективної теплопровідності пористого твердого холодоагенту в залежності від інтенсивності процесів кристалізації і сублімації на його межах, а також визначені критичні значення теплових потоків, вище яких структура втрачає спроможність до саморегулювання.
4. Визначені експериментальні теплові, температурні, динамічні, гідравлічні і габаритно - масові характеристики відкритих балоно - сублімаційних охолоджувачів (БСО).
5. Вперше отримані експериментальні дані по теплообміну при сублімації CO_2 в вузьких щілинах пористого теплообмінника в умовах, коли твердий блок холодоагенту прикладається до поверхні сублімації різницею тисків.

Вірогідність наукових результатів, наукових положень і практичних рекомендацій підтверджена задовільним погодженням розрахункових і експериментальних теплотехнічних і габаритно-масових характеристик дослідних зразків БСО, а також добрим збігом теоретичних і експериментальних температурних полів в холодоагенті.

Практичне значення роботи.

1. Розроблені в дисертації теорія утворення і існування капілярно-пористої структури в контурі холодильної машини, розрахункові співвідношення для визначення робочих характеристик охолоджувачів, а також програми і алгоритми дозволили створити прості і достатньо точні інженерні засоби проектування балоно - сублімаційних охолоджувачів відкритого типу.
2. Отримані експериментальні робочі характеристики дослідних зразків сублімаційних охолоджувачів можуть використовуватися як основний матеріал при їхній розробці і визначенні раціональних областей застосування.
3. Запропоновані засіб роботи, схеми і конструктивні вузли розімкнених і безупинно діючих сублімаційних холодильних машин, в яких відбуваються фазові переходи «пар - рідина - тверде тіло - пар».
4. Дослідні зразки БСО успішно використані як охолоджувачі ФЕМ і матриць ПЗЗ.

Апробація роботи.

Основні положення і результати дослідження викладені в 37 наукових роботах, в тому числі на десяти міжнародних конференціях, що проходили в США, Англії, Нідерландах, Італії, Індії, Португалії і Чехії, з яких 6 опубліковані в працях конференцій і 5 в вигляді тез, а також на 10-и конференціях в Україні і країнах СНД.

Особистий вклад автора підтверджують 22 самостійні наукові публікації. В них викладені теоретичні моделі, математичний опис і результати експериментальних досліджень охолоджувачів, в яких холодоагент набуває твердої пористої структури.

Структура і обсяг роботи.

Дисертація складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку використаної літератури (155 найменувань) і містить 281 сторінку, включаючи 75 малюнків, 22 фотографії і 2 таблиці.

СТИСЛИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Проведений літературний огляд по властивостям пористих матеріалів, гідравлічним процесам і процесам тепломасопереносу, що відбуваються в них, а також по холодильним і теплотехнічним приладам, в яких робоче тіло зазнає фазових переходів «рідина - тверде тіло - пар» дозволив встановити наступне.

1. Більшість розглянутих досліджень присвячена вивченню гідравліки і тепломасопереносу в тілах, що мають постійну і незмінну пористу структуру, або припускають ці умови навіть там, де їх немає (сублімаційна сушка, низькотемпературні камери БСО).

2. Дослідження тепломасопереносу в різноманітних отверділих газах враховують процеси в їх змінній пористій структурі. Однак, ці процеси пов'язані з обмеженою кількістю робочої речовини, є типово нестационарними і для їхнього використання при рішенні стационарних задач необхідні істотні уточнення.

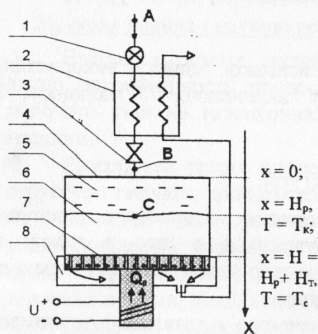
3. Є значні розбіжності між розрахунковими і раніше дослідженими експериментальними характеристиками БСО, для усунення яких необхідно враховувати специфічні процеси, що відбуваються в пористій структурі робочої речовини.

4. З проведеного аналізу випливає необхідність розробки теорії структуроутворення і уточненої математичної моделі тепломасопереносу в твердих робочих тілах, що мають пористу пульсуючу структуру. В частковості, потрібне істотне уточнення методик розрахунку низькотемпературних камер (НТК) БСО і перевірка їхньої вірогідності шляхом порівняння розрахункових і експериментальних характеристик.

На підставі результатів аналізу наукової літератури були сформульовані вищезазначені мета і задачі дослідження.

Експериментальні дослідження (візуальні спостереження).

Експериментальні дослідження проводилися на дослідних зразках розімкнених вуглекислотних НТК БСО. Принципова схема БСО представлена на мал. 1. Пуск охолоджувача відбувається слідуючим чином. Запас рідинного холодоагенту (CO_2) знаходиться в балоні (стан А) при температурі навколишнього середовища і тиску $p \approx 5 \dots 6$ МПа. При відкритті вентиля 1 рідинний холодоагент, відібраний з балону і заздалегідь підохолоджений в рекуперативному теплообміннику 2, дроселюється в пусковому дроселі 3 до тиску навколишнього середовища, яке повинно бути нижче потрійної точки. Пар і тверда фаза, що утворилися за дроселем, надходять в НТК 4. Тверді частки затримуються на поверхні газопроникливого теплообмінника 7, а пари через рекуперативний теплообмінник відводяться в довкідля (або в компресор).



Мал. 1 Схема балоно-сублімаційного охолоджувача

навантаження Q_0 від об'єкту охолодження.

По мірі накопичення твердої фази 6 робочий об'єм НТК герметизується, тиск в ньому зростає. З того моменту, коли тиск в НТК стає рівним тиску в балоні, дроселювання в пусковому дроселі припиняється і в камеру надходить рідинний холодоагент, що притискає тверду фазу до газопроникливого теплообмінника. На цьому процес пуску завершується.

В стаціонарному стані рідинна CO_2 з параметрами В рухається вниз по камері і охолоджується при постійному тиску до температури кристалізації (точка С). Охолодження рідинної фази холодоагенту і його кристалізація при високому тиску відбуваються за рахунок частини теплоти сублімації твердої CO_2 при низькому тиску. Інша частина теплоти сублімації компенсує теплове

Спостереження за процесами формування і функціонування блоку твердої пористої CO_2 в НТК БСО, які були проведені на візуальному зразку НТК (мал. 2), дозволили встановити наступне.

1. В контурі холодильної машини можливо організувати умови, при яких утвориться тверда фаза холодоагенту без порушення його циркуляції. До таких умов відносяться:

1.1 - наявність газопроникливого теплообмінника, поділяючого порожнини високого і низького тиску, причому останнє повинно бути нижче тиску потрійної точки холодоагенту;

1.2 - з допомогою рекуперативного теплообмінника повинно бути здійснене попереднє охолодження холодоагенту так, щоб при дроселюванні за пусковим дроселем утворювалася тверда фаза;

1.3 - розміри пор в теплообміннику повинні бути такими, щоб через них проходив пар і затримувалися тверді частки холодоагенту.

2. На кордонах блоку твердої фази протікають процеси сублімації і кристалізації. Незвичайність блоку полягає в тому, що значна його частина являє собою пористу структуру. Видно, що пористість пов'язана з капілярами, зароджуючимися на поверхні сублімації (мал. 3).

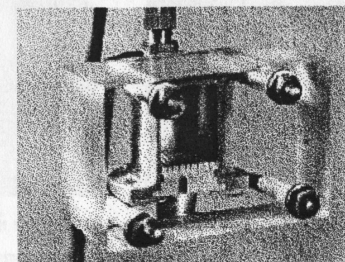
3. В процесі зростання структура досягає своєї найбільшої висоти, яка залежить від корисного теплового навантаження і не завжди співпадає з межею кристалізації блоку.

4. Дроселювання рідинної фази відбувається в мікрокапілярах структури і пов'язане з складними процесами тепломасообміну, які забезпечують інтенсивний перенос тепла з

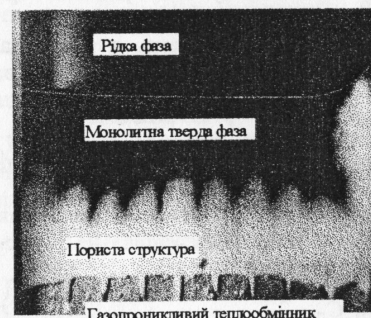
зони кристалізації в зону сублімації. Тому можна вважати, що твердий блок з капілярно-пористою структурою виконує роль ефективного рекуперативного теплообмінника між зонами кристалізації і сублімації.

5. Взаємодія потоку твердої фази холодоагенту, що просувається до кордону сублімації, і зростаючий йому назустріч структури, призводить до періодичного знищення і поновлення останньої. Циклічний характер розвитку структури зумовлює зміну висоти твердого пористого блоку холодоагенту і пульсатійний характер витрати парової фази. Період пульсації і

їхня амплітуда залежать від теплового навантаження і зменшуються з її зростанням. Початок періоду збільшення висоти блоку і масової витрати співпадає з проривом рідинної фази в мікрокапіляри, а змінюючий його період зменшення висоти - із зруйнуванням старої структури і виникненням на її місці нової. Цей процес візуально

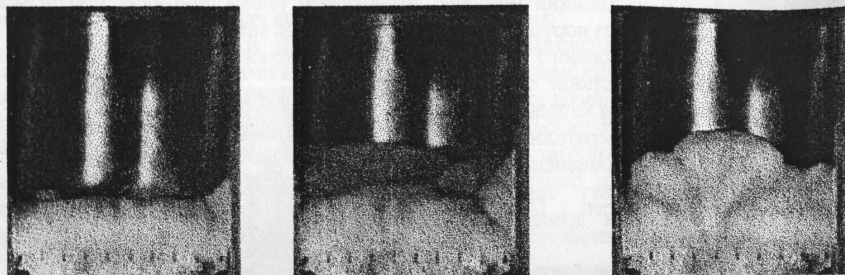


Мал. 2 Візуальна НТК



Мал. 3 Поперечний переріз НТК БСО

виглядає як періодичне збільшення і змінююче його зменшення висоти блоку твердої фази (мал.4).



Мал. 4 Процеси зміни висоти твердого пористого блоку холодоагенту

6. Зі збільшенням теплового навантаження Q_0 необхідно інтенсифікувати процес кристалізації, що відбувається автоматично шляхом зниження висоти твердої фази. Це, в поєднанні з процесами, які відбуваються в мікрокапілярах, призводить до висновку, що структура виконує роль авторегулюемого дроселя, узгоджуючого теплове навантаження, масовий видаток холодоагенту і геометрію твердого блоку.

7. Геометрія структури і динаміка її розвитку визначають конструктивні параметри НТК при заданому тепловому навантаженні, а також значення її граничного навантаження. Для всіх зразків, що досліджувалися, найбільше граничне теплове навантаження Q_{max} відповідало мінімальній товщині блоку твердого холодоагенту $H_T \leq 1$ мм. При $Q_0 \geq Q_{max}$ механічна стійкість блоку стає недостатньою для стримування рідинної фази холодоагенту. Блок руйнується і рідинна фаза проривається крізь теплообмінник.

8. Наші посередні оцінки, пов'язані з візуальними спостереженнями, а також дані, отримані Б. І. Веркіним і його співробітниками при спостереженні за процесами отвердіння газів, дозволяють затверджувати, що мікрокапіляри мають діаметри порядку $(0.5 \dots 1.0) \cdot 10^{-6}$ м при пористості твердого блоку 30...40%.

Розроблена теоретична модель поведінки трифазної системи «рідинний - твердий - пароподібний» холодоагент в НТК БСО.

В якості першого наближення блок твердої фази приймався монолітним, однорідним без внутрішніх джерел (стоків) тепла і маси. Диференціальне рівняння енергії для твердої фази холодоагенту має наступний вигляд:

$$\rho_T \cdot C_{PT} \cdot S_T \cdot \frac{dT}{dt} = \lambda_T \frac{d}{dx} \left(S_T \frac{dT}{dx} \right) - \dot{m} \cdot C_{PT} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Теплофізичні властивості твердої фази ρ_T , λ_T , C_{PT} - постійні, площа поперечного перетину рухомої твердої фази - S_T може прийматися як постійною, так і лінійною функцією від поточної висоти блоку; закон збереження маси $d\dot{m}/dx=0$ виконується.

На границях твердого блоку протікають фазові переходи кристалізації і сублімації і для них використані граничні умови I-го роду:

Границя кристалізації:
 $x = H_p; T = T_K(p_p);$ (2)

границя сублімації:
 $x = H; T = T_C(p_{oc}).$ (3)

де p_p , p_{oc} - тиск холодоагенту в балоні і тиск навколишнього середовища.

Температурне поле в рідинній фазі холодоагенту описувалося диференціальним рівнянням енергії, аналогічним рівнянню (1) при відповідних коефіцієнтах теплофізичних властивостей, масовій витраті і граничних умовах:

границя кристалізації: $x = H_p; T = T_K(p_p);$ (4)

вхід в НТК: $x = 0; \dot{m}_p i'(T_{oc}) - \lambda_{px} \nabla T|_{x=0} = \dot{m}_p i'(T_{x=0}) - \lambda_p \nabla T|_{x=0}.$ (5)

де S_{ax} і S - площі поперечних перерізів трубки, що підводить холодоагент, і НТК.

Тривким режимом роботи охолоджувача вважався такий режим, при якому НТК працює як завгодно довго без розгерметизації свого робочого об'єму, без прориву рідинної фази холодоагенту крізь теплообмінник. Це означає точне виконання балансів теплових потоків на границях блоку твердої фази.

Кристалізація: $\dot{m}_p C_{PP} \left[T_{x=0} - \frac{AT_{x=0} - T_K}{1-A} \right] + \dot{m}_p r_K = \dot{m}_T C_{PT} \frac{B(T_K - T_C)}{1-B}.$ (6)

Сублімація: $Q_0 - \dot{m}_T C_{PT} \frac{(T_K - T_C)}{B-1} = \dot{m}_T r_C.$ (7)

В рівняннях (6), (7) позначено: $A = \exp\left(\frac{\dot{m}_p C_{PP}}{\lambda_p S} H_p\right); B = \exp\left(\frac{\dot{m}_T C_{PT}}{\lambda_T S_T} H_T\right).$

Окрім цього, припускається, що $\dot{m}_p = \dot{m}_T$ і висота блоку твердої фази перевищує мінімальне допустиме значення H_{min} .

Балансові співвідношення (6) і (7) записані з урахуванням аналітичних рішень для відповідних градієнтів температур в рідинній фазі і твердому блоку, отриманих на підставі рівняння (1). Температура рідинної фази холодоагенту в перерізі $x = 0$ обчислюється з граничної умови (5) і має наступний вигляд:

$$T_{x=0} = \left(T_K - T_{oc} \frac{S}{S - S_{ax}} (1-A) \right) / \left(1 - \frac{S}{S - S_{ax}} A \right). \quad (8)$$

Якщо вважати, що S_T - площа перерізу твердої фази, яка просувається уздовж стінок НТК, лінійно залежить від координати x , змінюючись від значення S - площі поперечного перерізу НТК до S_{np} - площі поперечного перерізу прорізів теплообмінника:

$$S_T = [(S_{np} - S)/H_T] \cdot x + S, x \in [0 \dots H_T],$$

то рівняння (6) і (7) приймуть наступний вигляд:

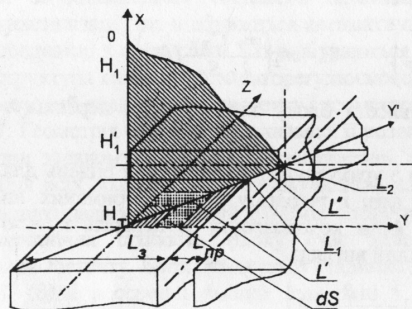
$$\dot{m}_p C_{PP} \left[T_{x=0} - \frac{AT_{x=0} - T_K}{1-A} \right] + \dot{m}_p r_K = \dot{m}_T C_{PT} \frac{(T_K - T_C)}{1 - [S_{np}/S] \frac{\dot{m}_T C_{PT}}{\lambda_T dS_T/dx}}, \quad (9)$$

$$Q_0 - \dot{m}_T C_{PT} \frac{(T_K - T_C)}{[S/S_{np}] \frac{\dot{m}_T C_{PT}}{\lambda_T dS_T/dx} - 1} = \dot{m}_T r_C. \quad (10)$$

Рівняння (1...10) відносяться до випадку, коли не використовується холод парів, які покидають НТК. При його врахуванні необхідно ці рівняння доповнити балансом теплообмінника 2 (мал. 1).

На базі наведених вище рівнянь була реалізована програма чисельного експерименту по визначенню області корисних теплових навантажень Q_0 , при яких НТК працює тривало, і відповідних цим Q_0 масовим витратам холодоагенту.

Наведені раніше результати візуальних спостережень свідчать про значну роль КПС в формуванні і наступному функціонуванні сублімаційної холодильної машини. Однак наведена вище математична модель не враховує самоорганізаційного капілярно-пористого структурування твердої фази. Для отримання відповідей на принципові питання, стосовно причин і рушійній сили процесу структурування, пульсаційного характеру зміни висоти блоку твердої фази і пов'язаних з цим пульсаціями витрат холодоагенту, особливостями тепломасопереносу в капілярно-пористому блоку, вимагається інша більш складна математична модель. Запропонована нижче динамічна модель структурування і тепломасообміну в пористому блоку базується на наступних припущеннях.



Мал. 5 Поверхня газопроникненого теплообмінника і модельний переріз капілярно-пористого блока.

Будемо вважати, що КПС є особливою формою фронту об'ємної сублімації, що ініціюється кондуктивно-конвективним тепловим потоком від зони кристалізації до зони сублімації на поверхні теплообмінника.

Структура складається з окремих мікрокапілярів, зароджуючихся на поверхні пористого теплообмінника. Щільність розташування центрів зародження визначається геометрією поверхні. Відзначимо, що пори в досліджуемому теплообміннику виконані в вигляді розташованих в шаховому порядку прорізів, з'єднаних через спеціальні проточки і колектор з навколишнім середовищем (мал. 5). Можливі і інші конструкції пористого теплообмінника.

Всередині мікрокапіляра, взаємодіючого з скелетом твердого блоку, також мають місце умови сублімації або десублімації, що визначаються розподілом тиску пари холодоагенту усередині кожного мікрокапіляра.

На етапі дослідження процесів зародження КПС блок твердої фази можна вважати постійної висоти. Середня висота блоку для НТК заданих розмірів і теплового навантаження Q_0 вибирається з урахуванням експериментальних даних.

Існуюча симетрія НТК і періодичність пористої структури поверхні теплообмінника дозволяє вибрати характерний елемент цієї структури, площину симетрії елементу і перейти до двовірної нестационарної моделі.

В твердому пластичному блоку холодоагенту має місце потік маси від кордону кристалізації до кордону поверхневої сублімації, що найбільш інтенсивна в прорізах теплообмінника і практично буде відсутня в зонах між порами.

Так як пластична рухома маса пористого холодоагенту є середою з розривними параметрами, то розрахунок елементів потоку твердої фази доцільно проводити на базі прийнятих в нинішній роботі модельних припущень про характер руху твердої фази і законів збереження.

З урахуванням симетрії системи вибираємо в якості моделюемого елементу чверть поверхні зубця теплообмінника спільно з половиною ширини навколишніх його прорізів і дільницею блоку твердої фази, розташованою над цим елементом (мал. 5).

Площина, яка перпендикулярна поверхні теплообмінника та проходить через діагональ зубця (X, Y) , є площиною симетрії для твердої фази холодоагенту. Останній рухається над цим зубцем від зони кристалізації до зони сублімації і, водночас, від центру зубця до прорізу. Для кожної точки цієї площини $w_x = w_z$, $\partial w_y / \partial y = \partial w_z / \partial z$. В силу симетрії рівняння для швидкості холодоагенту w і рівняння безперервності будуть мати наступний вигляд:

$$w^2 = w_x^2 + w_y^2 + w_z^2, \quad (11) \quad \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = \frac{1}{\rho_T} \dot{m}_V(x, y, z). \quad (12)$$

Моделюєма в вибраному перерізі капілярно-пориста структура являє собою сукупність окремих взаємозалежних мікрокапілярів числом N . Центри зародження мікрокапілярів діаметром d^0 і висотою H^0 розміщені на поверхні теплообмінника. Всі N зародків мікрокапілярів поділені на дві групи. В області зубця теплообмінника розташується N_z зародків, а в області прорізу - N_{np} , причому $N = N_z + N_{np}$. В кожній області центри зародження розміщені рівномірно.

Згідно прийнятому допущенню про капілярно-пористе структурування твердої фази холодоагенту як про специфічну форму фронту об'ємної сублімації, запишемо тепломасоперенос у мікрокапілярі наступним рівнянням взаємодії мікрокапіляра з оточуючий його рухомою твердою фазою холодоагенту:

$$(\lambda_T \nabla \bar{T}_x + \rho_T C_{pr} \bar{w}_x \bar{T}_c) \cos \varphi + (\lambda_T \nabla \bar{T}_y + \rho_T C_{pr} \bar{w}_y \bar{T}_c) \sin \varphi = \frac{d\dot{m}'' \cdot r_c}{dF} + \alpha(\bar{T}_c - \bar{T}^*). \quad (13)$$

Для розрахунку градієнтів температур на кордоні твердого блоку мікрокапіляра використовувалося двовірне нестационарне рівняння енергії рухомої речовини з постійними коефіцієнтами і об'ємними джерелами (стоками) тепла:

$$\rho_T C_{pr} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - C_{pr} \left(\dot{m}_x \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{m}_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_V(x, y). \quad (14)$$

Температура сублімації твердого холодоагенту в вершині мікрокапіляра залежить від тиску і, наприклад, для CO_2 розраховується по поліному, апроксимуючому дільницею прикордонної кривої "тверда-парова" CO_2 для області температур $T_c \in [194 \dots 216] K$.

Зміна тиску p_c на елементарній дільниці мікрокапіляра dh_i визначається рівнянням Пуазейля:

$$dp_c / dh_i = \dot{m}''(x + dh_x / 2, y' + dh_y / 2) \cdot 128 \cdot \nu'' / \pi \cdot D_i^4 \quad (15)$$

Граничною умовою для рівняння (15) може бути значення постійного тиску на виході з мікрокапіляру, яке дорівнює тиску навколишнього середовища.

При моделюванні процесу руху блоку пористої CO_2 будемо виходити з того, що нам відомі з фізичних міркувань характер поведінки $\dot{m}_x$ - компоненти масової витрати в кожній точці перерізу досліджуемого блоку та значення середньої масової витрати $\bar{m}_x$ через поперечний переріз блоку. Останнє може бути оцінено або на базі експериментальних даних, або розрахована згідно теорії ефективної теплопровідності пористої CO_2 в НТК БСО.

Для встановлення характеру функції $\dot{m}_x$ умовно поділимо блок пористого холодоагенту на окремі зони руху: I - зона рівномірного одновимірного «стержневого» руху; II - зона руху у поверхні зубця і поверхні прорізи теплообмінника. Між зонами I і II розташується перехідна зона.

Зона «стержневого» руху

Будемо вважати, що на відстані від поверхні теплообмінника, більшому або рівному ширині його зубця, режим руху твердої фази - «стержневий». Наявність такої зони рівномірного і одновимірного руху твердої фази підтверджується результатами візуальних спостережень, а також ретроспективним аналізом блоку твердої CO_2 , що була витягнута з НТК БСО.

Для цієї зони блоку твердого холодоагенту характерно:

$$0 \leq x \leq H_1, \text{ де } H_1 = (H_T - L_2); \quad \dot{m}_x = \bar{m}_x = \text{const}; \quad \dot{m}_y = 0; \quad \dot{m}_z = 0. \quad (16)$$

Тут H_T і L_2 - висота блоку твердого холодоагенту і ширина зубця теплообмінника.

Зона руху у поверхні теплообмінника

Область зубця теплообмінника

Процес сублімації твердої фази на поверхні зубця носить імовірний характер. Чим далі від прорізи до центру зубця, тим важче відведення пари і тим менш імовірність розвитку процесу сублімації.

Будемо вважати, що на поверхні зубця в розглядуємому перерізу компонента масового видатку твердої фази холодоагенту $\dot{m}_x$ підкоряється закону:

$$\dot{m}_x(H_T, y') = \bar{m}_x(H_1, y') \cdot R \cdot \delta \cdot f_3(y'), \quad (17)$$

де R - число з діапазону $[0...1]$, що виробляється генератором випадкових чисел; δ - максимальне відхилення $\dot{m}_x$ від $\bar{m}_x$; $\delta \in [1...1.1]$; функція $f_3(y')$ характеризує імовірність розвитку сублімації в поточному перерізі: $f_3(y') = a(y')^b + c$. Постійні a, b, c визначаються з граничних умов:

$$y' = 0: f_3 = 0; \quad y' = L_2/4 \cos(\pi/4): f_3 = 0.1; \quad y' = L_2/2 \cos(\pi/4): f_3 = 1. \quad (18)$$

Область прорізи теплообмінника

Сублімація твердого холодоагенту відбувається по всьому перерізу прорізи, що пояснюється практично рівними умовами відведення пари. На кордоні зубця теплообмінника і прорізи: $y' = L_1$ (мал. 5) сублімація протікає більш інтенсивно, ніж в центрі прорізи: $y' = L_2$, бо саме в цій області передається теплове навантаження від

бокової поверхні теплообмінника до сублімуючої твердої фази. Вираження для масового видатку холодоагенту в області прорізи теплообмінника буде мати наступний вигляд:

$$\dot{m}_x(H_T, y') = \dot{m}_x(H_T, L_2) \{1 + (2R - 1) \cdot \Delta \cdot f(y')\}, \quad (19)$$

де $\dot{m}_x(H_T, L_2)$ - значення масового видатку твердої фази холодоагенту по центру симетрії прорізи. Вона відповідає масовому видатку холодоагенту в тому же перерізі $y' = L_2$ в зоні I (мал. 5); $\Delta = 0.2$ - максимальне відхилення $\dot{m}_x(H_T, y')$ від $\dot{m}_x(H_T, L_2)$ в розглядуємому перерізі; $f(y')$ - функція імовірності розвитку сублімації в поточному перерізі:

$$f(y') = a(y' - L_2 / (2 \cos(\pi/4)))^b + c. \quad (20)$$

Постійні a, b, c визначаються з граничних умов:

$$f(y' = L_2 / (2 \cos(\pi/4))) = 1; \quad f(0.5(L_2 - L_2 / (2 \cos(\pi/4)))) = 0.1; \quad f(y' = L_2) = 0. \quad (21)$$

Рівномірність руху твердої фази холодоагенту в зоні I і в прорізі теплообмінника дозволяє припустити рівномірний «квазістержневий» характер руху твердої фази і в області над прорізом теплообмінника. Можливі збурення потоку вздовж x -координати описуються наступною лінійною функцією імовірності:

$$\phi(x) = (\phi(H_T) - \phi(L_2)) \cdot (x - L_2) / (H_T - L_2) + \phi(L_2) \quad (22)$$

з відповідними граничними умовами: $x \in [L_2, H_T]$; $\phi(L_2) = 0$; $\phi(H_T) = 1$. (23)

Остаточно, поведінка $\dot{m}_x$, яка є складовою масового видатку твердої фази в області над прорізом теплообмінника, описується наступним рівнянням:

$$\dot{m}_x(x, y') = \dot{m}_x(x, L_2) \{1 + (2R - 1) \cdot \Delta \cdot f(y') \cdot \phi(x)\} \quad (24)$$

В перехідній зоні над поверхнею зубця теплообмінника був прийнятий лінійний закон зміни $\dot{m}_x(x, y')$.

Система рівнянь (16) - (24) задає граничні умови і загальний вигляд закону зміни функції $\dot{m}_x(x, y')$ в області руху холодоагенту досліджуемого твердого блоку.

Зв'язок між потоком маси $\dot{m}_x(x, y')$ через площу елементарного осередку теплообмінника $S_i = (L_2 + L_{np})^2$ і відомим і постійним значенням масової витрати $\dot{m}_x$ через поперечний переріз блоку має вигляд:

$$\oint_{S_i} \dot{m}_x(x, y') dy' dz = \bar{m}_x S_i. \quad (25)$$

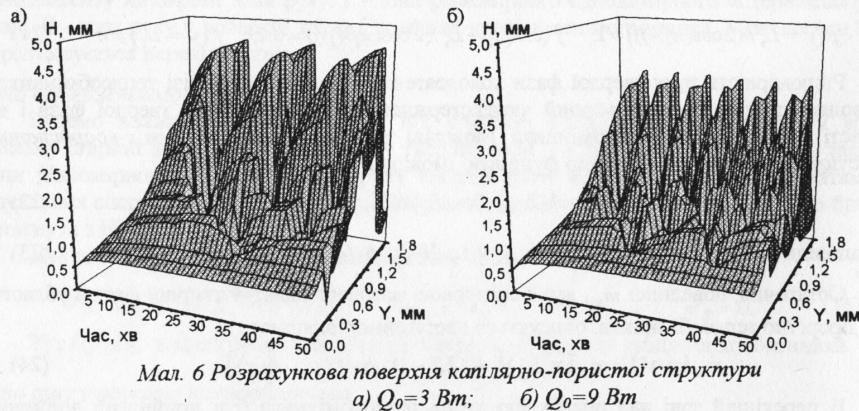
Тут L_{np} - ширина прорізи теплообмінника.

Рівняння (25) дозволяє за допомогою чисельних засобів встановити конкретні значення $\dot{m}_x(x, y')$. Розрахунок $\dot{m}_x(x, y')$ здійснювався на підставі рівняння (12), записаного з урахуванням симетрії розглядуємої системи та відповідною граничною умовою - $y' = 0$; $\dot{m}_x(x, y') = 0$.

Система рівнянь (11) - (25) істотно уточнює систему (1)-(10) і є основою для чисельної моделі процесів руху, тепломасообміну і розвитку КПС в блоку твердого холодоагенту в НТК БСО. Контроль на кожному тимчасовому кроку переміщення і деформації мікрокапілярів структури, що відбуваються в процесі руху блоку, дозволяє встановити момент руйнування мікрокапіляра і зародження на його місці нового.

На мал. 6 подані розраховані по наведеній вище моделі (рівняння (11) - (25)) дільниці поверхні капілярно-пористої структури в блоку твердого холодоагенту в залежності від часу при різноманітних значеннях теплового навантаження. Розрахунки проведені для НТК, висота якої рівна 30 мм, а діаметр - 24 мм.

Результати чисельного експерименту і його порівняння з експериментальними



Мал. 6 Розрахункова поверхня капілярно-пористої структури
а) $Q_0 = 3 \text{ Вт}$; б) $Q_0 = 9 \text{ Вт}$

візуальними спостереженнями дозволяють відзначити наступне.

Висота мікрокапілярів структури залежить від положення їхніх початкових координат на поверхні теплообмінника. Мікрокапіляри досягають максимальної висоти, якщо вони починають рости в області прорізи теплообмінника і їхня висота зменшується при збільшенні теплового навантаження. Причиною такої форми КПС є характер руху твердої фази у поверхні теплообмінника і пов'язаний з цим розподіл теплових потоків в блоку. Дана закономірність зберігається у всьому діапазоні розрахункових теплових навантажень $Q_0 \in [0, 21] \text{ Вт}$.

Форма структури, яка була отримана в ході обчислювальних експериментів, відповідає тій, що спостерігалась візуально в експерименті. Даний факт є побічним підтвердженням можливості пристосування запропонованої вище моделі структурування твердої фази холодоагенту і, як слідство, адекватності розподілу теплових потоків в блоку.

Моделюєма КПС є динамічним утворенням, що періодично виникає і руйнується. Період циклу існування і геометрія структури для НТК з теплообмінником заданих розмірів визначається тепловим навантаженням. При зростанні навантаження частота циклів поновлення структури збільшується, а амплітуда коливань середньої і максимальної висот структури зменшується. Цей результат погодиться з візуально спостережуваними збуреннями висоти блоку холодоагенту і експериментально

зареєстрованими пульсаціями витрати пари холодоагенту в зворотному потоці, частота яких також росте, а амплітуда зменшується при збільшенні теплового навантаження (мал. 7, 9).

Результати аналізу розрахункових поверхонь КПС приведені на мал. 7, з якого видно, що значення максимальних H_{max} і середньointегральних $\bar{H}$ висот КПС убавують з зростанням Q_0 . Водночас зменшується різниця між ними. Різниця $(H_{max} - \bar{H})$, що досягала при $Q_0 \sim 0.5 \text{ Вт}$ значення 2 мм, при $Q_0 > 17 \text{ Вт}$ складає тільки 0.5 мм.

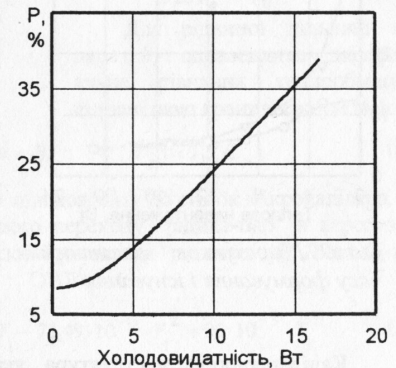
Згідно результатам візуальних спостережень процес дроселювання рідкої фази в мікрокапілярах структури грає визначальну роль в стабілізації висоти блоку твердого пористого холодоагенту, який перебуває під впливом корисного теплового навантаження. Аналіз залежностей $H(Q_0)$ дозволяє зробити висновок, що при значеннях $Q_0 < 2 \text{ Вт}$ для стабілізації товщини капілярно-пористого блоку достатньо активності мікрокапілярів максимальної висоти. Але вже при $Q_0 \geq 2 \text{ Вт}$ стабільність товщини блоку повинна забезпечуватися більшим числом мікрокапілярів, в тому числі і висотою $H \leq \bar{H}$. В

Мал. 7 Порівняння висот КПС

свою чергу, число мікрокапілярів пов'язане з пористістю твердого блоку, що визначається як відношення площі перерізів всіх мікрокапілярів до площі поперечного перерізу самого блоку (або до площі поперечного перерізу камери). На мал. 8 показана залежність пористості твердої CO_2 в камері від теплового навантаження (холодо-видатності), розрахованого по моделі (26) - (38). Як видно з мал. 8 пористість твердого блоку збільшується при зростанні холодовидатності від 5 до 35%.

З ходу експериментальної кривої $H_T(Q_0)$ (мал. 14) видно, що при $Q_0 \geq 11 \text{ Вт}$ робота НТК висотою 30 мм і діаметром 24 мм стає нестійкою, так як товщина блоку пористого холодоагенту досягає значення 1 мм і рідка фаза може прорватися в навколишнє середовище. Згідно розрахункам мінімальна висота твердого пористого блоку 1 мм настає при $Q_0^{\max} \sim 21-22 \text{ Вт}$ (мал. 7). Пояснення даному протиріччю було знайдене в аналізі динаміки утворення і зруйнування КПС.

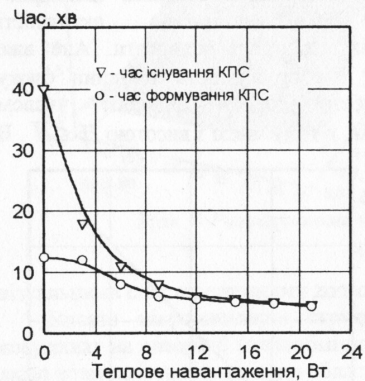
Кожний мікрокапіляр структури за час свого існування мінає стадію активного зростання, період стагнації (висота капіляра практично не змінюється) і руйнації



Мал. 8 Вплив холодовидатності на пористість CO_2

(зустрічний потік твердої фази, «перерізає» мікрокапіляр). На місці зруйнованого мікрокапіляра виникає новий і т. д. Позначимо через τ_f час, за який формуються мікрокапіляри структури в області прорізи теплообмінника. В цей період відбувається теплова взаємодія скелету і мікрокапіляра. Час існування структури τ_c - час від зародження до руйнування цих же мікрокапілярів. Величина $(\tau_f - \tau_c)$ визначає час, за який структура може виявити свою активність шляхом процесів дроселювання, що відбуваються в ній.

На мал. 9 приведені розрахункові залежності $\tau_f(Q_0)$ і $\tau_c(Q_0)$, отримані з аналізу поверхонь зростання КПС. Як і в випадку з $H_{max}(Q_0)$ і $\bar{H}(Q_0)$ залежності $\tau_f(Q_0)$ і $\tau_c(Q_0)$ є спадаючими, однак темп зменшення величини $(\tau_f - \tau_c)$ значно вищий. Вже при $Q_0 \geq 10$ Вт час зростання капіляра і час його існування практично співпадають. Це означає, що капіляри в цьому діапазоні навантажень фактично не працюють як дроселі і, тому, не утворює додатковий стік тепла біля межі «рідина фаза - твердий блок», стабілізуючий висоту блоку. Таким чином, динаміка поновлення КПС в значній мірі пояснює експериментальні значення Q_0^{max} , факт збільшення частоти і зменшення амплітуди



Мал. 9 Розрахункові залежності часу формування і існування КПС

пульсацій висоти блоку твердого пористого холодоагенту і видатку пари в зворотному потоці до їхнього повного зникнення по досягненню певних значень теплового навантаження. Іншими словами, при $Q_0 > 11...12$ Вт блок твердої фази холодоагенту, залишаючись капілярно - пористим, по суті, працює як монолітний і однорідний. А згідно наведеним вище результатам моделювання процесів теплопереносу в НТК заданої геометрії, в припущенні про монолітність і однорідність блоку, дана система нестійка. Отже, теплове навантаження в 11...12 Вт є граничною для НТК даних розмірів.

Таким чином, з урахуванням означеної кореляції розрахункових і експериментальних даних можна зробити висновок про придатність запропонованого механізму капілярно-пористого структурування твердої фази холодоагенту і справедливості слідуючих висновків.

Капілярно-пориста структура, яка виникає в блоку твердої CO_2 в НТК БСО, є специфічною формою об'ємної сублімації, що ініціюється кондуктивно-конвективним тепловим потоком від зони кристалізації до зони сублімації на поверхні теплообмінника. Таким чином, в пористому блоку холодоагенту водночас існують поверхня сублімація (на кордоні «блок - поверхня теплообмінника») і об'ємна - в мікрокапілярах.

Структура є динамічним утворенням з періодично повторюючимися фазами зростання, стагнації і руйнування. До неминучої загибелі КПС призводить та же причина, що викликає її до життя - взаємодія з рухаючимся потоком твердої фази холодоагенту.

На параметри структури (час зростання, стагнації, амплітуди середньої і максимальної висот) справляє визначальний вплив величина корисного теплового навантаження і геометрія пористої поверхні теплообмінника.

При розгляді умов формування мінімальної товщини блоку пористого холодоагенту в НТК БСО слід враховувати не тільки геометричні параметри КПС, але й динаміку її розвитку (співвідношення часів зростання і стагнації).

Розуміння фізичної природи структурування і динаміки поведінки розглянутої системи дозволило перейти до псевдостационарної математичної моделі процесів тепломасообміну в блоку пористого твердого холодоагенту, на межах якого відбуваються фазові переходи кристалізації і сублімації при істотно різних значеннях тиску. При цьому було прийняте, що блок твердого холодоагенту пронизаний конусовими мікрокапілярами, умовно представленими у вигляді телескопічної системи трьох циліндрів (мал. 10). Мікрокапіляри взаємно незалежні і уподібнені відкритим тепловим трубам з джерелом і стоком тепла і маси на кінцях. Геометричні співвідношення між елементами мікрокапіляра:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{h_1 + h_2}{h_1}, \quad \frac{d_2}{d_3} = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{h_1}, \quad h_1 + h_2 + h_3 = H_T, \quad \psi = \frac{h_1}{h_2 + h_3}, \quad \psi_1 = \frac{h_2}{h_3}. \quad (26)$$

Відношення ψ і ψ_1 визначаються з розрахунків з урахуванням експериментальних даних.

Течія рідини $\dot{m}$ на дільниці h_1 описується рівнянням Пуазейля:

$$\dot{m} = \frac{\pi d_1^4}{128 \nu_p} \frac{p_p - p_1}{h_1}. \quad (27)$$

Для рідинної дільниці капіляра h_1 справедливе диференціальне рівняння теплообміну з відповідною граничною умовою:

$$- \dot{m} C_p \frac{dT}{dx} + \alpha \pi (T_T - T) = 0, \quad x = H_p: \quad T(H_p) = T_T(H_p). \quad (28)$$

Тут α - коефіцієнт тепловіддачі від рідинного холодоагенту до стінок мікрокапіляра.

Для визначення тиску p_1 в точці фазового переходу «рідина-пар» в перерізі $x = H_p + h_1$ використовувалося рівняння кривої фазової рівноваги «рідина-пар». Для CO_2 воно має вигляд:

$$\lg p_1 = 3.13 - 867.21 \cdot T_1^{-1} + 18.66 \cdot 10^{-3} \cdot T_1 - 72.49 \cdot 10^{-6} \cdot T_1^2 + 93 \cdot 10^{-9} \cdot T_1^3. \quad (29)$$

Для опису гідродинаміки парових дільниць мікрокапіляра h_2 і h_3 застосовувалося, в залежності від режиму течії пара, рівняння Пуазейля, або рівняння молекулярної течії пара:

$$\dot{m}' = \frac{\pi}{3} \sqrt{\frac{\mu}{2\pi R}} \left[\frac{p_1}{\sqrt{T_1}} - \frac{p_2}{\sqrt{T_2}} \right] \frac{d_2^3}{h_2}. \quad (30)$$

Для перерізу $x = H$ вуглекислотне рівняння, що зв'язує тиск p_3 пара на виході з капіляра з температурою пара T_3 в цьому же перерізі, має вигляд:

xv 1309
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ

$$\lg p_3 = 8.27 - 1373.99 \cdot T_3^{-1} + 28.56 \cdot 10^{-3} \cdot T_3 - 159.28 \cdot 10^{-6} \cdot T_3^2 + 289.31 \cdot 10^{-9} \cdot T_3^3. \quad (31)$$

Для парових дільниць мікрокапіляра використовувалося рівняння теплообміну аналогічне рівнянню (28) з відповідними граничними умовами.

Наведені вище рівняння складають замкнуту систему, чисельне рішення якої дозволяє визначити параметри капіляра $h_1, h_2, h_3, d_1, d_2, d_3$, витіток холодоагенту через мікрокапіляр $\dot{m}$, температурні поля, теплові потоки, а також кількість тепла, що передається капіляром на елементарній дільниці dx .

Потужності внутрішніх джерел для дільниць з фазовими переходами холодоагенту визначаються співвідношенням $q_v = \dot{m} \cdot r$, де r теплота фазових переходів. Для інших дільниць капіляра потужність внутрішніх джерел визначається рівнянням:

$$q_v = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_j - T_{j-1}).$$

В програмі розрахунку передбачено контроль фазового стану холодоагенту в кожній точці рідинних і парових дільниць мікрокапіляра. Величини p і T в контрольних перерізах рідинної частини мікрокапіляра порівнювалися з залежністю $T(p)$ на лінії рівноваги "кристал-рідина", що для CO_2 має вигляд:

$$T = 216.49 + 0.02 \cdot p - 1.88 \cdot 10^{-6} \cdot p^2. \quad (32)$$

Контроль на парових дільницях здійснювався по рівнянню фазової рівноваги "пар-кристал" (31). Якщо послідовність фазових переходів в мікрокапілярі порушувалася, то проводилося уточнення геометричних параметрів мікрокапіляра.

Систему диференціальних рівнянь тепломасопереносу в твердій і рідинній фазах холодоагенту з відповідними граничними умовами (2) і (3) для твердої фази і (4) і (5) для рідинної фази можна записати слідувачим чином:

$$\lambda_T(T) \frac{d^2 T_T}{dx^2} + \frac{d\lambda_T}{dT} \left(\frac{dT_T}{dx} \right)^2 - \frac{\dot{m} C_{pT}(T) dT_T}{S - S_{nop}} + \frac{\alpha_T \pi}{S - S_{nop}} (T_w - T_T) + dq_v(x) = 0, \quad (33)$$

$$\lambda_p(T) \frac{d^2 T_p}{dx^2} + \frac{d\lambda_p}{dT} \left(\frac{dT_p}{dx} \right)^2 - \frac{\dot{m} C_{pp}(T) dT_p}{S} + \frac{\alpha_p \pi}{S} (T_w - T_p) = 0. \quad (34)$$

Диференціальне рівняння енергії для стінки НТК БСО:

$$x \in [0; H_p]; \quad \lambda_w S_w \frac{d^2 T_w}{dx^2} + \alpha_{oc} \pi (T_{oc} - T_w) + \alpha_p \pi (T_p - T_w) = 0; \quad (35)$$

$$x \in [H_p; H]; \quad \lambda_w S_w \frac{d^2 T_w}{dx^2} + \alpha_{oc} \pi (T_{oc} - T_w) + \alpha_T \pi (T_T - T_w) = 0.$$

Граничні умови:

$$x = 0; \quad T_w = T_0; \quad x = H; \quad T_w = T_c; \quad (36)$$

Тут α_T і α_p - лінійні коефіцієнти тепловіддачі від твердого і рідинного холодоагенту до стінки НТК; α_{oc} - коефіцієнт тепловіддачі від навколишнього оточення до стінки; S_w - площа поперечного перерізу стінки НТК; T_0 - температура стінки в перерізі $x=0$.

Для розрахунку функції розподілу потужності внутрішніх джерел тепла $q_v(x)$ використовувалася наведена вище система рівнянь гідродинаміки і теплообміну для кожної з дільниць мікрокапіляра.

Для опису процесів кристалізації і сублімації на кордонах твердого пористого блоку справедливі наступні рівняння:

$$\text{кристалізація} \quad -\lambda_p S \frac{dT_p}{dx} \Big|_{x=H_p} + \dot{m}_p r_c = -\lambda_T (S - S_{nop}) \frac{dT_T}{dx} \Big|_{x=H_p}; \quad (37)$$

$$\text{сублімація} \quad Q_0 - \lambda_T (S - S_{nop}) \frac{dT_T}{dx} \Big|_{x=H} = \dot{m}_T r_c. \quad (38)$$

Контроль одержуваних даних проводився за допомогою співвідношення, що впливає з загального енергетичного балансу охолоджувача:

$$\dot{m} = (Q_0 + \sum Q_T) / (i_{вх} - i_{вх}). \quad (39)$$

Тут $\sum Q_T$ - теплоприпливи в НТК; $i_{вх}, i_{вх}$ - ентальпія холодоагенту на виході і вході в НТК.

Використання в рівнянні (33) масиву значень $\{N q_v(x_i)\}$, де N - кількість мікрокапілярів, дозволяє визначити таке їхнє число, при якому дотримуються загальні теплові баланси НТК.

Моделювання процесів тепломасообміну в пористому холодоагенті в НТК БСО здійснювалося на ЕОМ з використанням чисельних засобів. Теплофізичні параметри CO_2 вибиралися з урахуванням їхніх температурних залежностей, що рекомендувалися В. В. Алтуніним.

Запропонована методика оцінки середньої ефективної теплопровідності пористого блоку, враховуюча наявні деякі експериментальні дані. Основне допущення - температурні поля в рідинній фазі і в твердому блоку лінійні. При лінійних температурних полях рівняння теплового балансу на кордонах твердого блоку (37) і (38) мають вигляд:

$$\lambda_p \cdot \frac{T_{x=0} - T_c}{H_p} + \frac{\dot{m} r_c}{S} = \lambda_{ef} \cdot \frac{T_c - T_c}{H_T}; \quad (40)$$

$$\lambda_{ef} \cdot \frac{T_c - T_c}{H_T} + \frac{Q_0}{S} = \frac{\dot{m} r_c}{S}. \quad (41)$$

Тут $\dot{m}, Q_0, H_p, H_T, S, T_{x=0}, T_c$ і T_c - відомі з експериментальних замірів величини.

З умов (40), (41) знаходяться і усереднюються значення λ_{ef} .

Диференціальне рівняння (33), що описує процеси тепломасопереносу в твердому пористому холодоагенті в НТК БСО, спільно з припущенням про лінійний характер температурного поля дозволяють однозначно визначити значення $d\lambda_{ef}/dx$:

$$d\lambda_{ef}/dx = \dot{m} \cdot C_{pT} / S. \quad (42)$$

Використовуючи як граничні умови значення λ_{ef} з рівнянь (40) або (41), легко установити залежність $\lambda_{ef}(x)$ і середнє значення $\bar{\lambda}_{ef}$, характерні для того або іншого режиму роботи НТК БСО.

Залежність $\lambda_{ef}(x)$, що враховує реальне температурне поле в твердому пористому холодоагенті, була отримана при чисельному рішенні наступного диференціального рівняння з відповідною граничною умовою:

$$\lambda_{ef}(x) S \frac{d^2 T}{dx^2} + S \frac{d\lambda_{ef}}{dx} \frac{dT}{dx} - \dot{m} C_{pT} \frac{dT}{dx} + \alpha_T \pi (T_w - T) = 0; \quad x = H: \lambda_{ef}(H) = \lambda_T(T_c). \quad (43)$$

Експериментальні дослідження (продовження)

Вище приведені схеми і конструкція дослідних зразків БСО, експериментальні дані, пов'язані з візуальними спостереженнями за процесами утворення і розвитку твердої фази холодоагенту і її капілярно-пористої структури. В даному розділі наведені результати експериментальних досліджень, задачі яких полягають у наступному.

1. Визначити реальні теплові, температурні, динамічні і габаритно-масові характеристики дослідних зразків БСО.
2. Для заданих конструкцій НТК встановити граничні значення холодової потужності, оцінити коефіцієнти тепловіддачі від пористої поверхні теплообмінника до сублимуючої CO_2 і температури об'єктів, що охолоджуються при різних теплових навантаженнях.
3. Оцінити якість запропонованих математичних моделей і параметричні області їхнього застосування.
4. Оцінити ефективну теплопровідність капілярно-пористої структури твердого блоку холодоагенту і її залежність від зовнішнього впливу.
5. Встановити вплив параметрів довкілля на характеристики БСО.

В дослідних зразках БСО немає зовнішнього рекуперативного теплообмінника, але встановлено вузол попереднього охолодження холодоагенту. Він виконаний у вигляді напівпровідникової термобатарей, на холодних спаях якої розміщена трубка, що з'єднує НТК з балоном. За допомогою напівпровідникового холодильника можна здійснити попереднє охолодження CO_2 до 253 К.

З метою заміру температурного поля безпосередньо в холодоагенті всередину НТК через верхню кришку вводилася тонкостінна трубка, що може переміщатися по висоті. В трубці містилася термopара, спай якої знаходився на виході з трубки. При пуску НТК трубка ущільнювалась твердою фазою і самогерметизувалася.

Досліджувалися два зразка НТК: камера №1 висотою 60 мм і діаметром 30 мм і камера №2 - висотою 30 мм і діаметром 24 мм. Матеріал стінок НТК - нержавіюча сталь товщиною 0.5 мм. Діаметри пористих теплообмінників відповідали діаметрам камер, а загальні поверхні прорізів в цих теплообмінниках дорівнювали відповідно 160 мм² і 110 мм².

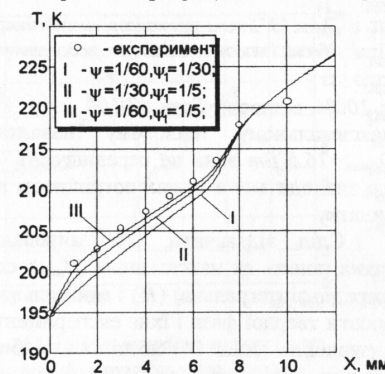
Температури вимірювалися хромель-копелевими терморпарами і електронним мілівольтметром ЦЧ-300 з абсолютної погрішністю, що не перевищує 0.1 град. Теплове навантаження імітувалося електронагрівачем, розташованим на зовнішній стороні газопроникливого теплообмінника. Відносна погрішність замірів електричної потужності нагрівача не перевищувала 2%. Миттєві і інтегральні витрати холодоагенту вимірювалися по пару за допомогою відповідних ротаметрів і газових лічильників з максимальною відносною погрішністю 10%. Час визначався по секундоміру з ціною ділення 0.1 с.

На мал. 11 представлені експериментальні і розрахункові температурні поля в холодоагенті. Відзначимо добре помітні перегини і зміни опуклості в експериментальній залежності $T(x)$ поблизу поверхні газопроникливого теплообмінника і кордону кристалізації. Характер перегинів вказує на те, що в твердому блоку холодоагенту поблизу теплообмінника є теплове джерело, а нижче зони кристалізації -

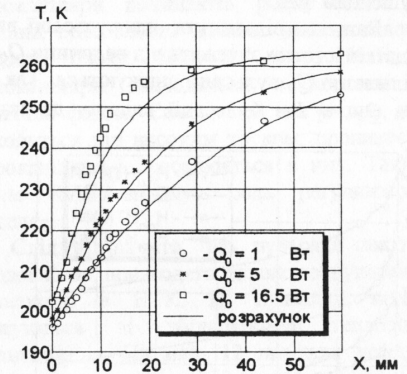
тепловий стік. Це підтверджує прийняту вище в псевдостационарній математичній моделі тепломасообміну в блоку пористого твердого холодоагенту (рівняння 26...38) гіпотезу про процеси, що відбуваються в мікрокапілярах. Найкращий збіг розрахункових і експериментальних даних в зоні твердої фази спостерігається для парних значень $\psi=1/60$ і $\psi_1=1/5$. В цій зоні НТК найбільша абсолютна розбіжність не перевищує 0.5 К, що складає приблизно 0.25%. Середнє значення розбіжності дорівнює 0.2 К. Таким чином, можна констатувати задовільний збіг розрахункових і експериментальних температурних полів в розглядуваному складному об'єкті і дати рекомендації по оцінці геометричних розмірів мікрокапілярів, якими слід користуватися при проведенні розрахунків.

На мал. 12 приведені експериментальні дані і розрахункові криві усереднених в часу температур стінки камери охолоджувача при $T_{ex}=263$ К. Середні $\bar{\delta}$ і максимальні

Порівняння розрахункових і експериментальних температурних полів



Мал. 11 Температурне поле у твердому холодоагенті



Мал. 12 Температурне поле в НТК БСО

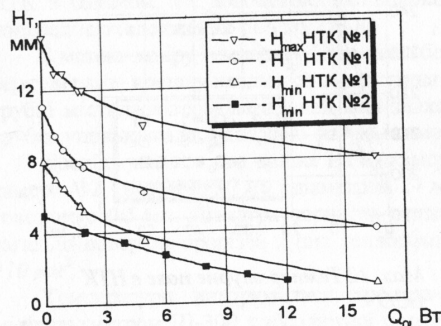
δ_{max} відхилення розрахункових даних від дослідних складала, наприклад, для режиму $Q_0=5$ Вт - $\bar{\delta}=0.6\%$, $\delta_{max}=1.5\%$.

На мал. 13...15 представлені експериментально встановлені залежності висоти твердої фази холодоагенту в НТК від часу і теплового навантаження для камер №1 і №2. Дані отримані шляхом спостережень на візуальних зразках і шляхом безпосередніх замірів геометрії твердого блоку, що був витягнутий з камери відразу після завершення експерименту.

Раніше відзначалося, що висота твердої фази пульсує в часу. Цей зв'язок представлений на мал. 13, а на мал. 14 наведена усереднена в часу залежність висот твердої фази від теплового навантаження. Теплове навантаження Q_0 є значенням постійним незважаючи на пульсації видатку холодоагенту.

Наведені на мал. 13 дослідні дані (для $Q_0 = 1 \text{ Вт}$) показують, що при цьому тепловому навантаженні висота твердої фази пульсує від 8 мм до 14...15 мм з періодом пульсацій ≈ 15 хвилин. Висота твердої фази однозначно пов'язана з кількістю твердого холодоагенту, накопиченого в НТК. Зростання обсягу твердої фази відбувається за рахунок кристалізації холодоагенту з рідкої фази і ця обставина вимагає інтенсифікації холодовидатних процесів, що зв'язано з збільшенням масового видатку пари холодоагенту. Тому на мал. 13 показана також зміна масового видатку пари. Відзначимо ще раз, що все це відбувається при постійному корисному тепловому навантаженні Q_0 . З графіків видно також, що характер зміни видатку співпадає з характером зміни висоти з невеликим зрушенням фаз.

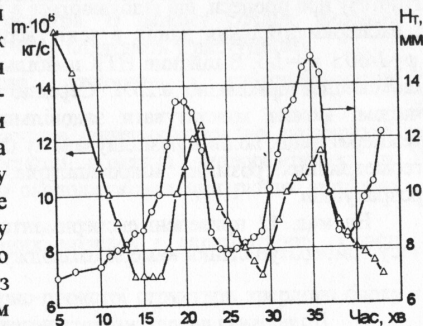
Важливо відзначити, що пульсації висот і видатків істотно залежать від величини Q_0 . При збільшенні Q_0 пульсації знижуються. Так якщо при $Q_0 = 1 \text{ Вт}$ пульсації видатку досягали 100% відносно бази ($7 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}$), то при



Мал. 14 Залежність висоти твердої фази від корисного теплового

на мал. 14 залежностей $H(Q_0)$ видно, що для НТК №1 значення $Q_{0\text{max}} = 16.5 \text{ Вт}$, а для камери №2 - $Q_{0\text{max}} = 11 \text{ Вт}$. Для цих значень висота твердої фази знижується до 1 мм і подальше збільшення Q_0 призводить до прориву рідинної фази в область низького тиску.

Для розрахункового зв'язку між холодовою потужністю і видатком холодильного агента в рамках матмоделі (26) - (38) слідує використати залежність $\bar{H}(Q_0)$. Область твердої фази охоплює температурний діапазон між потрійною точкою (точніше між температурою кристалізації при тиску $p_1 - 217...218 \text{ К}$) і температурою сублімації (195 К). По температурам стінки можна оцінити положення зони кристалізації в НТК і побачити, як вона переміщується при зміні теплового



Мал. 13 Часова залежність висоти твердої фази та масового видатку холодоагенту

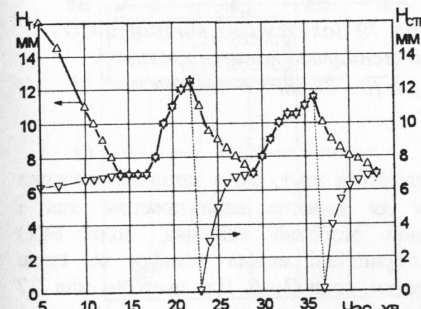
максимальному тепловому навантаженні $Q_{0\text{max}} = 16.5 \text{ Вт}$ вони не перевищують 7...8%, що знаходиться в межах погрішності виміру видатку.

Слід відзначити, що запровадження таких понять як максимальна (H_{max}), середня (середньоінтегральна) ($\bar{H}$) і мінімальна (H_{min}) висоти твердої фази і їхнє експериментальне визначення (мал. 14) не тільки відбивають реальні процеси в НТК, але також дозволяють придати їм фізичний сенс і зв'язати їх з режимними і конструктивними параметрами НТК. Так величина H_{max} визначає висоту камери, величина $\bar{H}$ - холодовидатність установки, а H_{min} - максимальну холодовидатність. З наведених

навантаження Q_0 . При цьому слід враховувати, що температура стінки в залежності від теплового навантаження може перевищувати температуру кристалізації на $5...10 \text{ град}$. З урахуванням цього зауваження і використовуючи мал. 12, можна вважати, що при $Q_0 = 1 \text{ Вт}$ зона кристалізації розташується на рівні $\approx 7 \text{ мм}$ над зоною сублімації (над поверхнею газопроникливого теплообмінника). При збільшенні Q_0 до 5 Вт і 16.5 Вт зона кристалізації опускається відповідно до 6 мм і 3 мм . Збіг з даними, наведеними на мал. 14, слід визнати задовільним, якщо враховувати пульсаційний характер процесів.

Вище відзначалося, що в твердій фазі необхідно розрізняти висоту твердої фази і висоту капілярно-пористої структури в ній. Спроможність до саморегулювання і приведення в відповідність видатку холодоагенту тепловому навантаженню залежить від співвідношення висот твердого блоку і КПС.

На мал. 15 приведені дослідні дані по пульсаціям висот твердого блоку і КПС, з яких видно, що часами висота КПС досягає висоти твердого блоку і КПС пронизує твердий блок наскрізь від зони сублімації до рідинної фази. Так з графіків видно, що зародившись, наприклад, на 23 хвилині мікрокапіляри починають рости і до 29 хвилини їхня висота досягає висоти всього твердого блоку. Між 29 хв і 36.5 хв мікрокапіляри знаходяться в контакт з рідинною фазою. Саме в цей час рідина, що знаходиться під високим тиском, проникає в мікрокапіляри і дроселюється в них. Таким чином КПС виконує роль регулюемого дроселя.

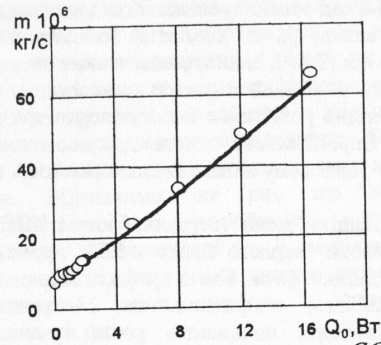


Мал. 15 Часова залежність висоти блоку твердої фази холодоагенту і висоти капілярно-пористої структури

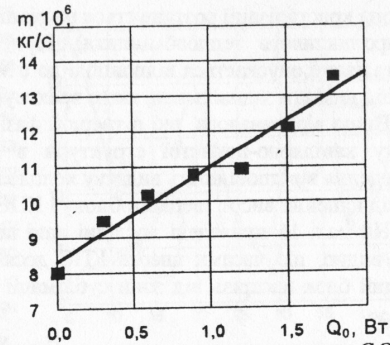
що незважаючи на наявні пульсації температур в камері на теплообміннику навантаження цих пульсацій немає. Експериментальні дані показали, що у всьому діапазоні досліджених значень Q_0 пульсації температур в об'єкті охолодження (на теплообміннику навантаження) не перевищували погрішностей вимірів температур - 0.1 град .

На мал. 16 представлені дослідні дані, що зв'язують корисне теплове навантаження Q_0 і середньоінтегральний видаток холодоагенту для НТК №1. В значення Q_0 не входять теплоприливи. Температура CO_2 на вході дорівнює 263 К , схема не включає рекуперативний теплообмінник. Видно, що залежність $\dot{m}(Q_0)$ має практично лінійний характер. Суцільною лінією на мал. 16 показана функція $\dot{m}(Q_0)$, розрахована по моделі, включаючи рівняння (26...38).

Можна вважати, що збіг розрахункових і експериментальних даних цілком задовільний. Максимальне відхилення не перевищує 8% і це знаходиться в межах



Мал. 16 Залежність витрати CO_2 від теплового навантаження; $Q_0 \in (0 \dots 17)$ Вт



Мал. 17 Залежність витрати CO_2 від теплового навантаження; $Q_0 \in (0 \dots 2)$ Вт

похибки експерименту.

Особливості розрахунку функції $\dot{m}(Q)$ полягають в тому, що в загальне значення теплового навантаження необхідно включати як корисне навантаження, так і теплоприплив в НТК. Оцінка теплоприпливів особливо важлива, коли БСО використовується як мікроохолоджувач. Теплоприпливи можна оцінити по вище наведеним дослідним даним, використовуючи режим, коли $Q_0=0$. Для цього на мал. 17 наведена частина мал. 16, відповідна малим тепловим навантаженням. З мал. 17 видно, що при $Q_0=0$ видаток CO_2 дорівнює $\dot{m} = 8 \cdot 10^{-6}$ кг/с. При відомих ентальпіях на вході і виході НТК легко з рівняння (39) визначити, що теплоприплив становить $Q_{тп} = 1.7$ Вт. Якщо температуру CO_2 на вході в НТК понизити до 253 К, то значення $Q_{тп}$ зросте до $Q_{тп} = 2.0$ Вт.

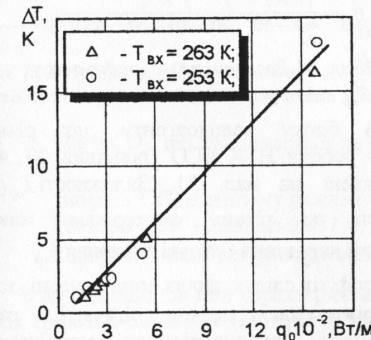
Для камери №2, працюючої без попереднього охолодження, видаток холодоагенту при $Q_0=0$ складає $\dot{m} = 2 \cdot 10^{-6}$ кг/с, що і визначило теплоприплив до камери - $Q_{тп} = 0.32$ Вт.

Досліджені динамічні характеристики дослідних зразків НТК характеризують час виходу на необхідний температурний рівень об'єкту охолодження і стабільність підтримання в часу теплових і температурних характеристик. Встановлено, що НТК виходить на постійний рівень температур за час, який не перевищує 5 хв.

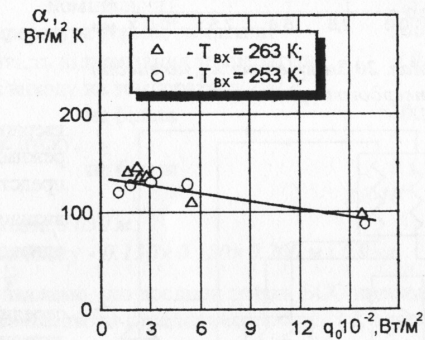
Стабільність температури об'єкту при $Q_0 = \text{const}$ може бути, як відзначалося вище, оцінена значенням 0.1 град в усьому діапазоні досліджених значень Q_0 . Однак температура об'єкту, що визначається, головним чином, температурою сублимації, залежить від Q_0 , і ця залежність пов'язана з процесами теплообміну при сублимації CO_2 на поверхні теплообмінника навантаження.

Проведені дослідження теплообміну між сублимуючим твердим пористим холодоагентом і поверхнею теплообмінника навантаження. Визначені температурні втрати, зв'язані з цим теплообміном (мал. 18). Коефіцієнт тепловіддачі при зміні щільності теплового потоку в межах $q_0 \in [10^2 \dots 1.6 \cdot 10^3]$ Вт/м² зменшувався від значення $\alpha \approx 150$ Вт/(м²·К) до $\alpha \approx 100$ Вт/(м²·К) (мал. 19). При розгляді цих значень слід враховувати, що вони відносяться до умов, коли твердий сублимуючий блок холодоагенту притискається до поверхні теплообмінника тиском рідини в балоні, рівним $\sim (55 \dots 60) \cdot 10^5$ Па, а пари, що утворюються, відводяться через пори теплообмінника. Тут тепловий потік відноситься до поверхні прорізів теплообмінника. При віднесенні теплового потоку до базової поверхні теплообмінника значення q_0 збільшується приблизно в 5 раз.

Таким чином, з мал. 18 видно, що в дослідних зразках при збільшенні Q_0 від значення $Q_0=0$ до значення $Q_0 = Q_{0\text{max}} = 16.5$ Вт температура об'єкту також



Мал. 18 Залежність різниці температур між поверхнею теплообмінника і сублимуючої CO_2 від щільності теплового потоку



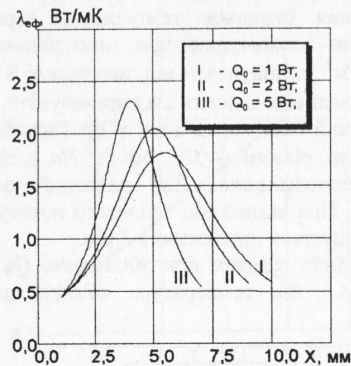
Мал. 19 Залежність коефіцієнта тепловіддачі від поверхні теплообмінника до сублимуючої CO_2 від щільності теплового потоку

збільшується від 195 К до 213 К.

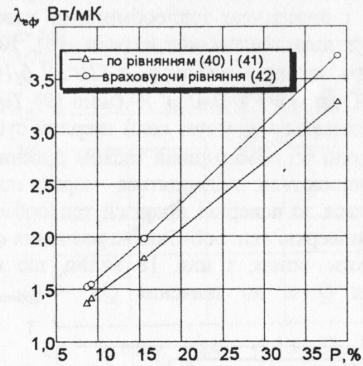
Тепломасоперенос в пористій структурі твердого робочого тіла може бути охарактеризований таким теплофізичним параметром як ефективна теплопровідність - $\lambda_{\text{эф}}$. Раніше в математичній моделі були отримані рівняння для розрахунку $\lambda_{\text{эф}}$ в залежності від координат і теплових потоків. Залежність $\lambda_{\text{эф}}(x)$ для заданих значень теплових потоків може бути тотожно уявлена в вигляді $\lambda_{\text{эф}}(T)$. На мал. 20 показані залежності $\lambda_{\text{эф}}(x)$ для різноманітних значень теплового потоку Q_0 , розраховані по рівнянню (43). Слід підкреслити, що в розглянутій пористій структурі тепловий потік змінюється по висоті твердого блоку від мінімального значення на кордоні кристалізації до найбільшого значення в зоні сублимації.

З графіків видно, що залежність $\lambda_{\text{эф}}(x)$ має чітко виділений максимум в зоні, де похідна dT/dx мінімальна. Зі збільшенням теплового навантаження максимум зростає і переміщується до зони сублимації.

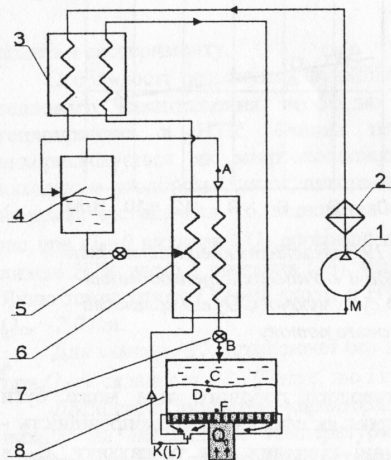
Середні значення коефіцієнта ефективної теплопровідності, визначені з урахуванням експериментальних даних по температурним полям, видаткам, висотам



Мал. 20 Змінювання $\lambda_{\text{эф}}$ по висоті твердого пористого блоку



Мал. 21 Залежність середнього $\lambda_{\text{эф}}$ від пористості



Мал. 22 Схема компресійно-сублімаційної холодильної машини: 1 – компресор; 2 – конденсатор; 3 – високо-температурний рекуперативний теплообмінник; 4 – сепаратор; 5 – дросель; 6 – низькотемпературний рекуперативний теплообмінник; 7 – пусковий дросель; 8 – НТК.

твердого блоку холодоагенту для різних режимів роботи НТК БСО (рівняння 40...42), представлені на мал. 21. Залежності $\lambda_{\text{эф}}(P)$, визначені по різним методикам, мають однаковий характер і близькі значення $\bar{\lambda}_{\text{эф}}$.

З графіків слідує, що як максимальні, так і середньоінтегральні значення $\lambda_{\text{эф}}$ в 5...8 разів перевищують теплопровідність монолітного блоку CO_2 .

Нагадаємо, що поняття ефективної теплопровідності, яка враховує властивості структури, дозволяє використати для розрахунків прості моделі, основані на припущенні, що в НТК розташується монолітний твердий блок з відомою ефективною теплопровідністю.

Тривалість і надійність роботи розміщеного вуглекислотного БСО дозволили розробити схеми компресійно-сублімаційних холодильних машин, в яких НТК використовується в якості головного робочого вузла. На мал. 22 наведена одна з імовірних схем машини, призначеної для використання суміші CO_2 -ізобутан, а на мал. 23 - основні елементи циклу низькотемпературного вузла.

При одноступеневому компресорі подібна вуглекислотна машина може використовуватися до температур порядку 190 K. Вона може застосовуватися також в якості низькотемпературної ступіні в каскадній холодильній машині.

Іспити дослідного зразка підтвердили перспективність запропонованої схеми.

На підставі наведених вище теоретичних і експериментальних досліджень були розроблені дослідні зразки вуглекислотних БСО для Пулковської і Вірменської обсерваторій. Зразки розроблялися по завданню ГАО АН СРСР. Нижче приводяться технічні характеристики одного з дослідних зразків БСО.

Холодовидатність	
максимальна	15 Вт
номінальна	2.5 Вт
Температура термостабілізації	200 K
Точність підтримання температури	± 0.3 K
Час виходу на температуру 200 K, не більш	300 с

Мал. 23 T-s діаграма процесів в компресійно-сублімаційній холодильній машині

Маса CO_2 , що споживається за час пуску, не більш	0.15 кг
Витрата CO_2 в сталому режимі	$2.8 \cdot 10^{-5}$ кг/с
Розміри НТК - діаметр 0.031 м, висота 0.030 м.	
Габарити і маса рефрижераторного блоку - 0.130 × 0.150 × 0.200 м і 0.9 кг.	

В доповнення до цих характеристик вкажемо, що дослідні зразки БСО працювали в горах тривко в діапазоні температур навколишнього середовища 300...243 K і повністю задовольняли умовам технічного завдання.

Висновки

- 1 Проведені у візуальній камері експериментальні дослідження показали, що в НТК БСО на газопроникливі поверхні може виникати пульсуюча капілярно-пориста структура твердого холодоагенту, утворена скелетом і безліччю упорядкованих періодично оновлюючихся мікрокапілярів, які беруть начало в зоні сублімації і пронизують твердий блок до його кордону з рідинною фазою.
- 2 Сформульовані необхідні і достатні умови утворення і тривалого існування капілярно-пористої структури твердого холодоагенту в замкненому контурі сублімаційних холодильних машин дозволили розробити нові схеми і конструкції машин, які працюють без порушення циркуляції і використовують специфічні властивості пористих структур.
- 3 Розроблена двомірна нестационарна модель структуроутворення в пористих холодоагентах призвела до розрахункових співвідношень, визначаючих процеси зародження, зростання, стаціонарного існування і знищення мікрокапілярів в вигляді просторових геометричних поверхонь.
- 4 Псевдостационарна математична модель, а також багатоступенева телескопічна форма мікрокапілярів і їхня подібність відкритим тепловим трубам дали можливість

оцінити теплові потоки на кордонах блоку твердого холодоагенту, де відбуваються процеси кристалізації і сублімації.

5 Проведене порівняння експериментальних і розрахункових характеристик БСО дало добре погодження, що підтверджує правомірність допущень, прийнятих при теоретичному аналізі, і можливість застосування запропонованих рівнянь для розрахунку розглянутих систем.

6 Дослідження властивостей пульсуючої структури дозволило виявити її нову функцію, яка виявляється в тому, що вона може виконувати роль саморегулюємого дроселя, автоматично оптимізуючого роботу холодильної машини при різноманітних корисних теплових навантаженнях.

7 Вивчення тепломасопереносу в капілярно-пористій структурі твердої CO_2 показало, що вона має ефективну теплопровідність, перевищуючу теплопровідність звичайної твердої фази в 5-8 раз, і це дає можливість використати блок пористого холодоагенту в якості ефективного рекуперативного теплообмінника, працюючого в діапазоні температур між фазовими переходами кристалізації і сублімації, що відбуваються при істотно різних значеннях тиску.

8 Дослідження експериментальних зразків сублімаційних охолоджувачів показали, що щільність теплового потоку від об'єкту охолодження до сублімуючого холодоагенту не повинна перевищувати значень $q_0 \approx 2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, віднесених до площі базової поверхні газопроникливого теплообмінника. Перевищення навантаження призводить до прориву рідкої фази в область низького тиску і до зворотного руйнування пористої структури в твердому холодоагенті.

9 Запропоновані нові схеми компресійно-сублімаційних охолоджувачів допускають перехід робочого тіла в твердий стан без порушення циркуляції, поширюючи вибір робочих тіл і температурні діапазони роботи охолоджувачів.

10 Дослідні зразки вуглекислотних балонно-сублімаційних охолоджувачів успішно використані в астрономічних обсерваторіях України, Росії і Вірменії для охолодження фотомножителів до температури 200 К при тепловому навантаженні 6 Вт.

Основний зміст дисертації викладений в публікаціях:

1. Баглюк В.П., Дворніщін А.П., Роженцев А.В., Себов А.А. Балонный сублимационный охладитель. - Вопросы радиоэлектроники, Серия ОВР(ТРТО), 1989, вып. 12, с.27-33.
2. Роженцев А.В. Тепломассоперенос в пористых хладагентах сублимационных охладителей. - Вопросы радиоэлектроники, Серия ОВР(ТРТО), 1990, вып. 12, с. 93-101.
3. Баглюк В.П., Дворніщін А.П., Роженцев А.В., Себов А.А. Математическая модель баллонно-сублимационного охладителя. - Холодил. техника и технология: Респ. міжвід. наук.-техн. сб., 1989, вып. 48, с. 32-34.
4. Баглюк В.П., Дворніщін А.П., Роженцев А.В. Баллонный сублимационный охладитель. - Приборы и техника эксперимента, 1989, № 6, с. 12.
5. Белозорова Л.А., Котюков Ю.Д., Роженцев А.В. Устройство термостабилизации катода фотозлектронных умножителей. - Приборы и техника эксперимента, 1986, №3, с.11-12.
6. Роженцев А.В. Эффективная теплопроводность пористой углекислоты. - Холодил. техника и технология: Респ. міжвід. наук.-техн. сб., 1994, вып. 56, с. 57-61.
7. Роженцев А.В. Компрессионно-сублимационная холодильная машина, работающая на твердом хладагенте. - Холодильная техника, 1992, № 11-12, с. 24-25.

8. Rozhentsev A.V., Naer V.A., Rubnikov M.V. Eine Kältemaschine mit Drossel-Sublimation, - Die Kälte und Klimatechnik, 1995, №11, s. 940-944.

9. Rozhentsev A.V., Smirnov G.F. Dynamics of interconnected processes of structure formation, melting, crystallization of solid carbondioxide into atmosphere. - 10th Int. Heat Transfer Conf., Brighton, 1994, 7-FM-27, Vol. 4, p. 151-156.

10. Роженцев А.В., Смирнов Г.Ф. К вопросу об эффективной теплопроводности твердой CO_2 , сублимирующей на пористой поверхности. - Праці І-ї Російської Національної Конф. по Теплообміну, Москва, 1994, т. VII, с. 179-183.

11. Rozhentsev A.V., Smirnov G.F. Refrigerating machine using phase transition liquid-solid-vapour. - Inter. Seminar and Workshop "Heat pipes, heat pumps, refrigerators", The Academy of sciences of Belarus, September 12-15, 1995, Minsk, Belarus, p. 24 - 29.

12. Rozhentsev A.V., Naer V.A., Rubnikov M.V., Zaslavsky V.M. Structure and Heat and Mass Transfer in Solid Capillary Porous Refrigerants. - Proceedings of 2nd European Thermal-Sciences and 14th UTT National Heat Transfer Conference, Rome, Italy, May 29-31, 1996, Vol. I, p. 379-384.

13. Rozhentsev A.V. A throttle-sublimation refrigerating machine using the solid coolant with changeable porous structure. - Proc. of 19th Int. Congr. of Refrigeration, The Hague, The Netherlands, August 20-25, 1995, v. IIIa, 3 Equipment and Processes, p. 176-183.

14. Роженцев А.В. Экспериментальные исследования температурных характеристик баллонно-сублимационного охладителя. - Придніпровський науковий вісник, науковий журнал, Машинобудування, №54 (65), грудень 1997, с. 35-38.

15. Роженцев А.В. Анализ устойчивости режимов работы баллонно -сублимационного охладителя. - V наук.-метод. конф. "Человек и окружающая среда-проблемы непрерывного экологического образования в ВУЗах", Сб. наук. праць, Україна, Одеса, 16-18 вересня 1996, с. 133.

16. Роженцев А.В. Твердые теплохладоносители с подвижной капиллярно-пористой структурой. - Придніпровський науковий вісник, науковий журнал, №8(19), березень 1997, с. 13-14

17. Роженцев А.В. Динамическая модель углекислотного баллонно-сублимационного охладителя. - V наук.-метод. конф. "Человек и окружающая среда - проблемы непрерывного экологического образования в ВУЗах", Сб. наук. праць, Україна, Одеса, 16-18 вересня 1996, с. 134.

18. Роженцев А.В. Капиллярно-пористое структурирование твердой CO_2 , сублимирующей на газопроницаемой поверхности. - Придніпровський науковий вісник, науковий журнал, № 8(19), березень 1997, с. 11-12

19. Роженцев А.В. Модель тепломассообмена в пористой структуре озонобезопасного хладагента - CO_2 . - V наук.-метод. конф. "Человек и окружающая среда - проблемы непрерывного экологического образования в ВУЗах", Сб. наук. праць, Україна, Одеса, 16-18 вересня 1996, с. 135

20. Rozhentsev A.V. Dynamics of the structure formation and heat-and-mass transfer in solid capillary-porous refrigerants. - Proceedings of 8th Annual Int. Energy Week Conf., January 28-30, 1997, Houston, Texas, USA, book VI, v.I, p. 14-28.

21. Роженцев А.В. Тепломассоперенос в твердых теплохладоносителях с меняющейся под воздействием граничных условий пористой структурой. - IV Всесоюзная конф. молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики", Новосибирск, Инст. теплофизики СБ АН СРСР, 1991, с.194-195.

22. Наер В.А., Роженцев А.В., Заславский В.В. Углекислотный сублимационный охладитель. - Матеріали 60-ї наук.-техн. конф. Теорія і Практика ВУЗовської Науки, Одеса, Одеська Держ. Академія Холоду, 1995, с. 49-50.

23. Rozhentsev A.V. Solid coolant with changeable porous structure. - 13th European Conf. on Thermophysical Properties, 29 August-3 September 1993, Lisboa, Portugal, Ps1-19.

24. Роженцев А.В., Заславский В.М. Контактный теплообмен при сублимации углекислоты на газопроницаемой металлической поверхности. - Деп. в ДНТБ України 13.12.94, № 2400-Ук94, 10 с.

25. Роженцев А.В., Заславский В.В. Стационарная модель тепломассообмена в самоорганизующихся пористых структурах.- Материали 60-ї наук.-техн. конф. Теория и Практика ВУЗовской Науки, Одеса, Одеська Держ. Акад. Холоду, 1995, с. 42.
26. Роженцев А.В. Компрессионная-сублимационная холодильная машина.- Межреспубликанская науч.-практич. Конф. Совершенствование холодильной техники и технологии для эффективного хранения и переработки сельхозпродукции, Краснодар, 1992, с. 6.
27. Роженцев А.В., Заславский В.В. Анализ устойчивости режимов работы баллонно-сублимационного охладителя.- Материали 60-ї наук.-техн. конф. Теория и Практика ВУЗовской Науки, Одеса, Одеська Держ. Акад. Холоду, 1995, с. 27.
28. Роженцев А.В. Динамика сопряженных процессов структурообразования, плавления, кристаллизации и сублимации твердой углекислоты в атмосферу.- IX школа-семинар молодых ученых и специалистов Современные проблемы газодинамики и тепломассообмена и пути повышения эффективности энергетических установок, 17-22 травня '93, МДТУ, Москва, с.54-55
29. Rozhentsev A.V. Solid coolant with changeable porous structure.- 11th Int. Cong. of Chemical Engineering, Chemical Equipment Design and Automation, Praha, 29.08. - 03.09.1993, p. G8[787].
30. Роженцев А.В. Математическая модель структурообразования в капиллярно-пористых хладагентах.- Тепловые режимы охлаждения РЭА, науч.-тех. сб., № 4, 1997, с.22-26.
31. Роженцев А.В. Тепломассообмен в пористых хладагентах баллонно – сублимационных охладителей; Автореф. дис.... канд.техн.наук.-Одеса, 1991.- 16 с. (ДСВ).
32. Роженцев А.В. Холодильная машина, работающая на твердом хладагенте.- Холодильная техника и технология, №1(57), 1997, с. 23-27.
33. Rozhentsev A.V. Capillary-porous structures as a specific form of a volume sublimation in solid refrigerants.- Third ISHMT/ASME Heat and Mass Transfer Conf., Indian Inst. of Technology, Kanpur, India, December 29-31 1997, p.279-284.
34. Rozhentsev A.V., Rubnikov M.V. A peculiarity of effective thermal conduction in solid capillary-porous refrigerants.- Third ISHMT/ASME Heat and Mass Transfer Conf., Indian Inst. of Technology, Kanpur, India, December 29-31 1997, p.285-287.
35. Rozhentsev A.V. Percolation and heat-and-mass transfer in solid capillary-porous refrigerants.- Cryogenic Engineering Conf. / Int. Cryogenic Materials Conf., Portland, Oregon, USA, July 28 - August 1 1997, p. GFG-AB-412.
36. Роженцев А.В. Дроссельно-сублимационная холодильная машина, работающая на твердом хладагенте с изменяющейся пористой структурой.- Придніпровський науковий вісник, науковий журнал, №15(26), травень 1997, с.40-43.
37. Роженцев А.В. Теплообмен при сублимации CO_2 на пористой поверхности.- Придніпровський науковий вісник, науковий журнал, Машинобудування, №54(65), грудень 1997, с.10-13.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ, ІНДЕКСИ І СКОРОЧЕННЯ

λ , ν і ρ - коефіцієнти теплопровідності, Вт/(м·К); кінематичної в'язкості, м²/с і щільності, кг/м³, C_p - ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); p , T , i - тиск, Па, температура, К і ентальпія, Дж/кг; q_v і $\dot{m}_v$ - інтенсивність внутрішніх джерел теплоти, Вт/м³ і маси, кг/с·м³; R і μ - універсальна газова постійна, Дж/(моль·К) і молекулярна маса холодоагенту, кг/моль; H , d і S - висота, м, діаметр, м і площа поперечного перерізу, м²; Q_0 і $\Sigma Q_{\text{тп}}$ - корисне теплове навантаження і сумарний теплоприплив в НТК, Вт; τ - час, с; $\dot{m}$ - масовий видаток, кг/с; α - лінійний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м·К); P - пористість твердого блоку.

t - тверда фаза; p - рідина фаза холодоагенту; κ - кристалізація; s - сублимація; w - стінка НТК, os - оточуюче середовище; ef - ефективне значення; НТК - низькотемпературна камера; БСО - балонно-сублимаційний охолоджувач; КПС - капілярно-пориста структура.

АНОТАЦІЯ

Роженцев А. В. Капілярно-пористі структури в твердих холодоагентах: умови утворення, теплофізичні властивості, функціональні можливості, сублимаційні охолоджувачі на їхній основі. - Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук по спеціальності: 05.04. 03 - холодильна та кріогенна техніка, системи кондиціювання. - Одеська державна академія холоду, Одеса, 1998.

Теоретично і експериментально досліджені умови виникнення і тривалого існування в контурі холодильної машини твердої фази холодоагенту з рухомою капілярно-пористою структурою. Вивчені теплофізичні властивості структури і процеси тепломасопереносу, що відбуваються в ній. Розроблені і досліджені дослідні зразки вуглекислотних сублимаційних охолоджувачів, в яких реалізовані багатфункціональні можливості структури і в яких капілярно-пористий твердий холодоагент існує без порушення циркуляції. Визначені раціональні області застосування холодильних машин, працюючих з твердим холодоагентом.

Ключові слова: твердий холодоагент, сублимаційний охолоджувач, капілярно-пориста структура, самоорганізаційне структурування.

SUMMARY

Rozhentsev A.V. Capillary-porous structures in solid refrigerants: conditions of formation, thermophysical properties, functionalities, sublimation coolers on the basis of them. - the manuscript.

Thesis for a degree of the doctor of technical sciences on speciality 05.04.03 – refrigerating and cryogenic engineering, system of conditioning. Odessa State Academy of Refrigeration, Odessa, 1998.

Theoretically and experimentally conditions of occurrence and long existence of the solid phase of refrigerant with dynamic capillary-porous structure in a contour of the refrigerating machine were investigated. There were studied thermophysical properties of structure and heat and mass transfer, occurring in it. Experimental samples of CO_2 sublimation coolers, in which the multifunctional opportunities of structure are realized and in which is capillary - porous solid refrigerant exists without infringement of circulation were worked out and investigated. The rational areas of application of the refrigerating machines working with the solid refrigerant were determined.

Key words: solid refrigerant, sublimation, cooler, capillary-porous structure, self organizing structure formation, heat exchange.