

Автореф
Р 62

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

Для служебного пользования

Экз № 00099

На правах рукописи

РОЖЕНЦЕВ Андрей Вячеславович

ТЕПЛОМАСООБМЕН В ПОРИСТЫХ ХЛАДАГЕНТАХ
БАЛЛОННО-СУБЛИМАЦИОННЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ

Специальность 01.04.14 - теплофизика и молекулярная физика;
05.04.03 - машины и аппараты холодильной и криогенной техники
и систем кондиционирования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДСП. Исх. №	12
Осн. _____ л.	Прилож. _____ л.
„ 23 ”	11 1991 г.

Одесса-1991

000

Работа выполнена в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им. М.В.Ломоносова

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Геллер В.З.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Чайковский В.Ф.
доктор технических наук,
профессор Смирнов Г.Ф.

Ведущая организация - НИИ "Шторм", г. Одесса.

Защита диссертации состоится "25" декабря 1991 г.
в "13⁰⁰" часов на заседании специализированного совета
К 068.35.04 в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им. М.В.Ломоносова по адресу: 270039, г.Одесса, ул.Свердлова, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского технологического института пищевой промышленности

Автореферат разослан "23" ноября 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

К.Т.В., доцент

Тяшенко В.Н.

ОНАХТ 24.09.10
Тепломассообмен в по



v017813



АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ.

В последнее время в холодильной технике и теплотехнике начали использовать установки, в которых с рабочим веществом происходят фазовые переходы жидкость-твердое тело-пар. Это баллонно-сублимационные охладители (БСО), холодильные установки, использующие отвержденные в вакууме газы, низкотемпературные устройства с пористыми теплообменниками (ПСТ), установки сублимационной сушки. В теплообменных аппаратах указанных установок рабочее вещество может находиться в виде твердого блока, на границах которого происходят процессы кристаллизации и сублимации при разных давлениях и температурах. Эти условия приводят к появлению пор и микрокапилляров. Подобные твердые рабочие вещества-хладагенты, с изменяющейся под влиянием внешних условий пористой структурой, изучены недостаточно, что не позволяет проводить с требуемой точностью расчеты и оптимизацию установок. Последнее и определяет актуальность настоящего исследования, связанного с анализом процессов тепломассопереноса в твердых пористых хладагентах и разработке на их основе усовершенствованных конструкций баллонно-сублимационных охладителей.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Цель - теоретическое и экспериментальное исследование процессов тепломассопереноса в твердом пористом хладагенте (CO_2) и разработка на их основе БСО.

Задачи. Разработка математической модели тепловых процессов, происходящих в пористой структуре твердого тела, и определение эффективных значений его теплофизических свойств.

Определение закономерностей изменения структуры и геометрии твердого пористого хладагента в зависимости от интенсивности фазовых переходов на его границах.

Экспериментальное определение тепловых, температурных, динамических и габаритно-массовых характеристик опытных образцов БСО.

Оценка достоверности математической модели путем сравнения расчетных и опытных характеристик низкотемпературных камер (НТК) БСО.

Разработка методов расчета НТК БСО.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

1. Проведенные визуальные наблюдения показали, что возникающая в НТК пористая структура твердого хладагента (CO_2) образована сетью упорядоченных периодически открывающихся и закрывающихся микрокапилляров, берущих начало в зоне сублимации и пронизывающих твердый блок до его границы с жидкой фазой.

2. Разработана математическая модель тепломассопереноса в пористом

теле, основанная на гипотезе подобия микрокапилляров открытым тепловым трубам.

3. Установлено, что эффективная теплопроводность пористой структуры, существующей в НТК БСО, в несколько раз превышает теплопроводность монолитного твердого хладагента.

4. Выявлены закономерности изменения структуры, геометрии и эффективности теплопроводности пористого хладагента в зависимости от интенсивности процессов кристаллизации и сублимации на его границах.

5. Установлено, что НТК БСО обладает свойством саморегулирования, при котором путем самостоятельного изменения структуры и геометрии твердого пористого хладагента автоматически приводится в соответствие расход хладагента тепловой нагрузке. В опытных образцах саморегулирование наблюдалось более чем при десятикратном изменении нагрузки.

НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ.

1. В блоке твердого хладагента, сформировавшегося в НТК БСО, под влиянием происходящих при разных давлениях процессов кристаллизации и сублимации возникает капиллярно-пористая структура, характер которой зависит от теплового потока и которая в широком диапазоне тепловых нагрузок самопроизвольно регулирует геометрию блока, расход хладагента и холодопроизводительность БСО.

2. Теоретическая модель, использующая гипотезу подобия капилляров пористой структуры открытым тепловым трубам с зонами дросселирования, испарения, конвективного переноса и десублимации, с удовлетворительной точностью описывает теплофизические свойства твердого пористого хладагента и теплотехнические характеристики БСО.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ.

Полученные экспериментальные данные и предложенная методика расчета позволили определить тепловые, температурные и габаритно-массовые характеристики баллонно-сублимационных охладителей и области их применения. Опытные образцы БСО использованы для охлаждения и термостабилизации на уровне 200 К фотоумножителей при астрономических наблюдениях в Главной астрономической обсерватории АН СССР.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.

Основные положения и результаты исследования изложены в 6 печатных работах, доложены на 4-ой Всесоюзной конференции молодых исследователей, Новосибирск, 1991 г. и использованы при выполнении научно-исследовательской работы - "Разработать и исследовать охладители ФЭУ и матрицы ПЭС", входящей в план АН СССР, - госре-

гистрация № 01880071450, УДК 536.48; 621.596.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ.

Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов и приложения. Работа содержит 156 страниц, включая 55 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Проведенный литературный обзор по холодильным и теплотехническим устройствам, в которых рабочее вещество претерпевает фазовые переходы жидкое-твердое тело-пар, позволил установить следующее.

1. Имеются значительные расхождения между расчетными и экспериментальными характеристиками ранее исследованных БСО, для устранения которых требуется учет специфических процессов, происходящих в пористой структуре рабочего вещества.

2. Большинство рассмотренных исследований посвящено теплопереносу в телах, имеющих постоянную пористую структуру.

3. Исследования по теплопереносу в различных отвержденных газах, учитывают процессы в их изменяющейся пористой структуре. Однако, эти процессы связаны с ограниченным количеством рабочего вещества, являются типично нестационарными и для их использования при решении стационарных задач необходимы существенные уточнения.

4. Из проведенного анализа вытекает необходимость разработки уточненной математической модели теплопереноса в пористых рабочих веществах и, в частности, методики расчета НТК БСО, проверки их достоверности путем сравнения расчетных и экспериментальных тепловых, температурных и габаритно-массовых характеристик БСО.

На основании результатов анализа научной литературы были сформулированы вышеуказанные цель и задачи исследования.

Проведены визуальные исследования процессов формирования и функционирования блока твердой пористой углекислоты. В результате наблюдений, проводимых на визуальном образце НТК БСО, установлено следующее.

1. Твердое рабочее тело, сформировавшееся в НТК БСО, имеет пористую структуру, образованную микрокапиллярами, пронизывающими твердый блок насквозь от зоны сублимации до зоны кристаллизации.

2. Микрокапилляры, в своем большинстве, не пересекаются, т.е. независимы и образуют организованную структуру.

3. Диаметр микрокапилляра изменяется по высоте блока, увеличиваясь к зоне сублимации.

4. В микрокапилляре идут активные процессы теплопереноса, связанные с поступлением в них жидкости, ее испарением, передвижением паров в низкотемпературную зону и десублимацией в этой зоне.

5. С увеличением тепловой нагрузки, т.е. с увеличением интенсивности фазовых переходов на границах твердого блока, толщина блока уменьшается, что указывает на существование максимальной тепловой нагрузки.

С учетом проведенных выше результатов визуальных наблюдений разработана модель стационарных процессов теплопереноса в блоке пористого твердого хладагента, на границах которого происходит кристаллизация и сублимация при существенно различных давлениях. При этом было принято, что блок твердой CO_2 пронизан коническими микрокапиллярами, условно представленными в виде трех цилиндрических зон. Капилляры взаимно независимы и уподоблены открытым тепловым трубам с источником и стоком тепла и массы на концах.

Систему дифференциальных уравнений теплопереноса в твердой и жидкой фазах хладагента и в стенке НТК ВСО с соответствующими граничными условиями можно записать следующим образом:

$$\lambda_T(T) \cdot \frac{d^2 T_T}{dx^2} + \frac{d\lambda_T}{dT} \left[\frac{dT_T}{dx} \right]^2 - \frac{\dot{m} \cdot C_T(T)}{S} \cdot \frac{dT_T}{dx} + \frac{\alpha_T \cdot \pi}{S} \cdot (T_O - T_T) + dq_v(x) = 0; \quad (1)$$

$$x=L: T_T(L) = T_S; \quad x=H: T_T(H) = T_{кр};$$

$$\lambda_{ж}(T) \cdot \frac{d^2 T_{ж}}{dx^2} + \frac{d\lambda_{ж}}{dT} \left[\frac{dT_{ж}}{dx} \right]^2 - \frac{\dot{m} \cdot C_{ж}(T)}{S} \cdot \frac{dT_{ж}}{dx} + \frac{\alpha_{ж} \cdot \pi}{S} \cdot (T_O - T_{ж}) = 0; \quad (2)$$

$$x=H: T_{ж}(H) = T_{кр};$$

$$x=0: -\lambda_{ж} \cdot S \cdot \left. \frac{dT_{ж}}{dx} \right|_{x=0} = k_{ж} \cdot \pi \cdot (T_{oc} - T_{ж}(0)) + \dot{m} \cdot C_{ж} \cdot (T_{oc} - T_{ж}(0)); \quad (3)$$

$$\lambda_c \cdot S_c \cdot \frac{d^2 T_c}{dx^2} + \alpha_{oc} \cdot \pi \cdot (T_{oc} - T_c) + \alpha \cdot \pi \cdot (T - T_c); \quad (4)$$

$$x=L: T_c(L) = T_L; \quad x=0: T_c(0) = T_O.$$

Для кристаллизации и сублимации на границах твердого пористого блока справедливы следующие уравнения:

$$\lambda_{ж} \cdot \left. \frac{dT_{ж}}{dx} \right|_{x=H} - \frac{\dot{m} \cdot r_{кр}}{S} = \lambda_T \cdot \left. \frac{dT_T}{dx} \right|_{x=H}; \quad -\lambda_T \cdot S \cdot \left. \frac{dT_T}{dx} \right|_{x=L} + Q_O = \dot{m} \cdot r_s. \quad (5); \quad (6)$$

Контроль получаемых данных производился с помощью соотношения, вытекающего из общего энергетического баланса охладителя:

$$\dot{m} = (Q_O + \sum Q_{ТП}) / (i_{внх} - i_{вх}). \quad (7)$$

Для расчета функции распределения мощности внутренних источников тепла $q_v(x)$ была предложена приведенная ниже система уравнений. Геометрические соотношения капилляра:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{L_1 + L_2}{L_1}, \quad \frac{d_2}{d_3} = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{L_1}, \quad L_1 + L_2 + L_3 = L-H, \quad (8)$$

$$\Phi = \frac{L_1}{L_2 + L_3}, \quad \Phi_1 = \frac{L_2}{L_3}.$$

Отношения Φ и Φ_1 определяются из вариантных расчетов с учетом экспериментальных данных.

Течение жидкости на участке L_1 описывает уравнение Пуазейля:

$$\dot{m}' = \pi \cdot d_1^4 \cdot (p_O - p_1) / (128 \cdot \nu_{ж} \cdot L_1). \quad (9)$$

Для жидкостного участка капилляра L_1 справедливо дифференциальное уравнение теплообмена с соответствующим граничным условием:

$$-\dot{m}' \cdot C_{ж} \cdot \frac{dT}{dx} + k_{ж} \cdot \pi \cdot (T_T - T) = 0, \quad x=H: T(H) = T_T(H). \quad (10)$$

Для определения давления p_1 в точке фазового перехода жидкость-пар в сечении $x=H+L_1$ использовалось уравнение кривой фазового равновесия жидкость-пар:

$$\lg p_1 = 3.13 - \frac{867.21}{T} + 18.66 \cdot 10^{-3} \cdot T - 72.49 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 93.10 \cdot 10^{-9} \cdot T^3. \quad (11)$$

Для описания гидродинамики паровых участков микрокапилляра L_2 и L_3 применялось в зависимости от режима течения пара уравнение Пуазейля, либо уравнение молекулярного течения пара:

$$\dot{m}' = \frac{\pi}{3} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{2 \cdot \pi \cdot R}} \cdot \left[\frac{p_{вх}}{\sqrt{T_{вх}}} - \frac{p_{внх}}{\sqrt{T_{внх}}} \right] \cdot \frac{d^3}{L}. \quad (12)$$

Для сечения $x=L$ уравнение, связывающее давление p_3 пара на выходе из капилляра с температурой пара T_3 , имеет вид:

$$\lg p_3 = 8.27 - \frac{1373.99}{T} + 28.56 \cdot 10^{-3} \cdot T - 159.28 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 289.31 \cdot 10^{-9} \cdot T^3. \quad (13)$$

Для паровых участков микрокапилляра использовалось уравнение теплообмена типа (10) с соответствующими граничными условиями.

Приведенные выше уравнения составляют замкнутую систему, численное решение которой позволяет определить параметры капилляра $L_1, L_2, L_3, d_1, d_2, d_3$, расход хладагента \dot{m}' , температурные поля,

тепловые потоки, а также количество тепла, передаваемое капилляром на элементарном участке dx .

Мощности внутренних источников для участков с фазовыми переходами хладагента определяются соотношением $q_v = \dot{m} \cdot r$, где r — теплота фазовых переходов. Для остальных участков капилляра $q_v = \dot{m} \cdot C \cdot (T_j - T_{j-1})$.

В программе расчета предусмотрен контроль фазового состояния хладагента в каждой точке жидкостного и паровых участков микрокапилляра. Величины p и T в контрольных сечениях жидкостной части микрокапилляра сравнивались с зависимостью $T(p)$ на линии равновесия кристалл-жидкость.

$$T = 216.49 + 0.02 \cdot p - 1.88 \cdot 10^{-6} \cdot p^2. \quad (14)$$

Контроль на паровых участках осуществлялся по уравнению фазового равновесия пар-кристалл (13).

Если последовательность фазовых переходов в микрокапилляре нарушалась, то проводилось уточнение параметров микрокапилляра.

Использование в уравнении (1) массива значений $(N \cdot q_v(x_1))$, где N — количество микрокапилляров, позволяет определить такое их число, при котором соблюдаются общие тепловые балансы НТК.

Моделирование процессов теплообмена в пористом хладагенте в НТК БСО осуществлялось на ЭВМ с использованием численных методов. Теплофизические параметры CO_2 выбирались с учетом их температурных зависимостей, рекомендованных В.В. Алтуниним.

Предложена методика оценки средней эффективной теплопроводности пористого блока, учитывающая имеющиеся некоторые экспериментальные данные. Основное допущение — температурные поля в жидкой фазе и в твердом блоке линейные.

При линейных температурных полях уравнения теплового баланса на границах твердого блока (5) и (6) имеют вид:

$$\lambda_x \cdot \frac{T_{вх} - T_{кр}}{H} + \frac{\dot{m} \cdot r_{кр}}{S} = \lambda_{эф} \cdot \frac{T_{кр} - T_s}{\delta} \quad (15); \quad \lambda_{эф} \cdot \frac{T_{кр} - T_s}{\delta} + \frac{Q_0}{S} = \frac{\dot{m} \cdot r_s}{S} \quad (16)$$

Здесь \dot{m} , Q_0 , δ , H , S , $T_{вх}$, $T_{кр}$ и T_s — известные из экспериментальных замеров величины.

Из (15) и (16) находятся и усредняются значения $\lambda_{эф}$.

Дифференциальное уравнение (1) совместно с предположением о линейном характере температурного поля позволяют однозначно определить величину $d\lambda_{эф}/dx$:

$$d\lambda_{эф}/dx = \dot{m} \cdot C/S. \quad (17)$$

Используя в качестве граничного условия значение $\lambda_{эф}$ из уравнения (15) или (16), нетрудно восстановить зависимость $\lambda_{эф}(x)$ и среднее значение $\lambda_{эф}$, характерные для того либо иного режима работы НТК БСО.

Зависимость $\lambda_{эф}(x)$, учитывающая реальное температурное поле твердой пористой CO_2 в НТК БСО, была получена при численном решении дифференциального уравнения с соответствующим граничным условием:

$$\lambda_{эф}(x) \cdot S \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} + S \cdot \frac{d\lambda_{эф}}{dx} \cdot \frac{dT}{dx} - \dot{m} \cdot C_T \cdot \frac{dT}{dx} + \alpha \cdot \pi_T \cdot (T_c - T) = 0, \quad (18)$$

$$x=L: \quad \lambda_{эф}(L) = \lambda_T(T_s).$$

Экспериментальное исследование НТК БСО. Задачи исследования.

1. Определить реальные тепловые, температурные, динамические и габаритно-массовые характеристики опытных образцов охладителей.
2. Для заданных конструкций НТК установить предельные значения холодопроизводительностей, оценить коэффициенты теплоотдачи от пористой поверхности теплообменника к сублимирующей CO_2 и температуры охлаждаемых объектов при разных тепловых нагрузках.
3. Оценить качество предложенной математической модели и параметрические области ее применения.
4. Оценить эффективную теплопроводность пористого твердого блока хладагента и ее зависимость от внешних воздействий.
5. Установить влияние параметров среды на характеристики БСО.

В экспериментальном стенде при измерении температур использованы медь-константановые термопары и цифровой ампервольтметр Ф-30. Определение расхода пара хладагента проводилось газовым счетчиком ГСБ-400 в сочетании с цифровым секундомером-таймером СТС-1. Тепловую мощность, выделяемую электронагревателем, определяли по току и падению напряжения, измеряемыми приборами М104 и В7-35. Узел предварительного охлаждения хладагента выполнен в виде полупроводниковой термобатареи, на холодных спах которой расположена трубка, соединяющая НТК с баллоном. С ее помощью можно охлаждать CO_2 до 253 К. С целью замера температурного поля непосредственно в хладагенте внутрь НТК через верхнюю крышку вводилась перемещающаяся по высоте тонкостенная трубка. В трубке размещалась термопара, спай которой находился на выходе из трубки. При пуске НТК трубка уплотнялась твердой фазой и самогерметизировалась.

Исследовались два типа НТК: первый — $d=30$ мм, $L=30$ мм; второй

Сравнение расчетных и экспериментальных температур

в твердом хладагенте

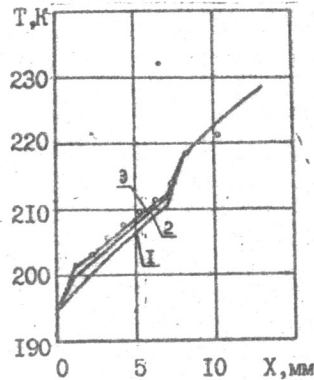


Рис. 1. о - эксперимент, — - расчет; 1 - $\Psi = 1/60$, $\Psi_1 = 1/30$; 2 - $\Psi = 1/30$, $\Psi_1 = 1/5$; 3 - $\Psi = 1/60$, $\Psi_1 = 1/5$

- $d=31$ мм, $L=60$ мм. Измерение температурного поля хладагента проводилось во втором образце НТК.

В результате проведенных экспериментов получены данные по температурным полям в стенке НТК и в хладагенте при различных тепловых нагрузках и различных температурах входа хладагента в НТК. Установлены связи между холодопроизводительностью и толщиной твердой фазы в НТК, определены динамические характеристики образцов, зависимость между расходом хладагента и тепловой нагрузкой, максимальные значения холодопроизводительности, эффективная теплопроводность и пористость хладагента.

Обсуждение полученного экспериментального материала проведено путем сопоставления расчетных и опытных данных. На рис. 1 представлены опытное и расчетное температурное поле в хладагенте. Отметим хорошо просматривающиеся перегибы и изменения выпуклости в опытной зависимости $T(x)$ вблизи поверхности пористого теплообменника и границы кристаллизации. Характер перегибов указывает на то, что в твердом теле вблизи теплообменника имеется тепловой источник, а ниже границы кристаллизации - тепловой сток. Это подтверждает принятую гипотезу о процессах, происходящих в микрокапиллярах. Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных в зоне

в стенке НТК БСО

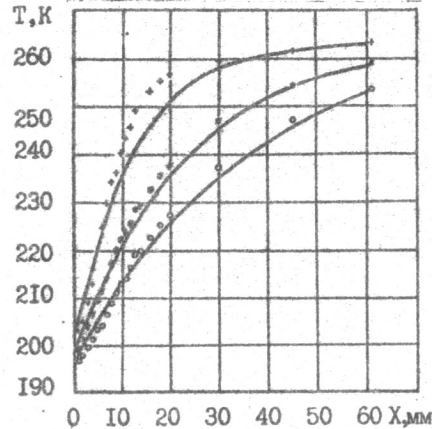


Рис. 2. о - $Q_0 = 1$ Вт, х - 5 Вт, + - 16,5 Вт; — - расчет

твердого рабочего вещества наблюдается для парных значений величин $\Phi=1/60$ и $\Phi_1=1/5$. В этой зоне НТК наибольшее абсолютное расхождение не превышает 0.5 К, что составляет примерно 0.25 %. Средняя величина расхождения равна 0.1 К. Таким образом, можно констатировать удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных и дать рекомендации по оценке геометрических размеров микрокапилляров, которыми следует пользоваться при проведении расчетов.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные и расчетные кривые температур стенки камеры БСО для второго образца НТК при $T_{вх}=263$ К. Средние δ и максимальные δ_{max} отклонения расчетных данных от экспериментальных составляли, например, для режима $Q_0=5$ Вт - $\delta=0.6$ %, $\delta_{max}=1.5$ %.

Из температурных зависимостей были определены и трудно рассчитываемые величины теплопритоков в НТК, но только для режима, когда $Q_0=0$. В этом случае для первой камеры, работающей без предварительного охлаждения, расход хладагента составлял $\dot{m}=2 \cdot 10^{-6}$ кг/с, что и определило теплоприток в камеру - $Q_T=0.32$ Вт. Для второй камеры, имеющей в два раза большую высоту, при температуре входа $T=253$ К и $T=263$ К (массовый расход соответственно $\dot{m}_0=7 \cdot 10^{-6}$ кг/с и $\dot{m}_0=8 \cdot 10^{-6}$ кг/с) соответствующие значения теплопритоков равны $Q_T=1.7$ Вт и $Q_T=2$ Вт. Значительно большие теплопритоки во вторую камеру обусловлены не только ее размерами, но и более низким общим температурным уровнем камеры. В указанных величинах теплопритоков значительную долю составляют теплопритоки через узел стыковки, связывающий подводящие трубопроводы и камеру. Доля этого теплопритока в зависимости от режима работы НТК составляет от 45 до 80 %.

Исследованы динамические характеристики второго образца НТК, характеризующие время выхода на требуемый температурный уровень охлаждаемого объекта и стабильность поддержания во времени тепловых и температурных характеристик. Установлено, что НТК выходит на постоянный уровень температур за время, не превышающее 5 мин. Температурный уровень зависит от величины полезной тепловой нагрузки и на его стабильность (± 0.3 К) не влияют имеющиеся пульсации и вспучивания хладагента в твердой фазе.

Обнаружен пульсационный характер зависимости массового расхода хладагента от времени. Относительная величина пульсаций возрастает с уменьшением тепловой нагрузки. Так для $Q_0=0$ (теплопритоки составляют $Q_T=2.2$ Вт) пульсации равны ~ 6.3 %. При тепловой нагрузке $Q_0=2.0$ Вт максимальные пульсации снижаются до 3%. Пульсации

расхода не приводят практически к пульсациям температуры.

Проведено экспериментальное исследование зависимости толщины и профиля твердой фазы в НТК от тепловой нагрузки путем непосредственных замеров геометрии твердого блока, извлеченного из камеры сразу после завершения эксперимента. Установлена сложная форма блока с наплывами у стенок и утоньшениями в центре. Определен физический смысл среднеинтегральной, минимальной и максимальной толщины твердой CO_2 , выявлена связь этих параметров с геометрическими характеристиками НТК БСО.

Исследован теплообмен между сублимирующимся пористым твердым хладагентом и пористой поверхностью теплообменника нагрузки. Определены температурные потери, связанные с этим теплообменом. Коэффициент теплоотдачи при изменении плотности теплового потока в пределах $q_0 = (10^2 + 1.6 \cdot 10^3)$ Вт/м² уменьшался от значения $\alpha \sim 150$ Вт/(м²·К) до $\alpha \sim 100$ Вт/(м²·К). При рассмотрении этих величин следует учитывать, что они относятся к условиям, когда сублимирующий блок прижимается к поверхности теплообменника давлением жидкости в баллоне (60 бар), а образующиеся пары отводятся через поры теплообменника.

На рис. 3 приведены расчетные и экспериментальные зависимости расхода CO_2 от холодопроизводительности НТК. Их сравнение дает максимальное расхождение в 12.8 %. Среднее расхождение составляет 8 %. Следует отметить, что величина расхождения нарастает по мере увеличения холодопроизводительности, т.е. с увеличением пористости твердого блока CO_2 , расположенного в НТК.

На рис. 4 представлены зависимости $\lambda_{\text{эф}}(x)$ для различных значений теплового потока Q_0 . Следует подчеркнуть, что в рассматриваемой пористой структуре тепловой поток переменен по высоте твердого блока, изменяясь от минимального значения у границы кристаллизации до наибольшего значения в зоне сублимации.

Из графиков видно, что зависимость $\lambda_{\text{эф}}(x)$ имеет четко выраженный максимум в зоне, где производная dT/dx минимальна. С увеличением тепловой нагрузки максимум возрастает и смещается в направлении зоны сублимации.

Средние значения коэффициента эффективной теплопроводности, определенные по уравнениям (15), (16), (17) для разных режимов работы НТК БСО, представлены на рис. 5. Зависимости $\lambda_{\text{эф}}(P)$, определенные по разным методикам, имеют одинаковый характер и близкие значения $\lambda_{\text{эф}}$.

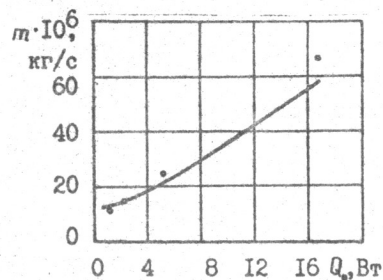


Рис. 3. Сравнение зависимости расхода CO_2 от холодопроизводительности
о - эксперимент, - - расчет

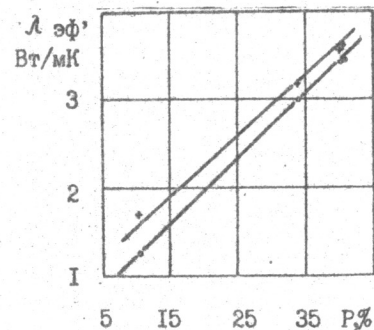


Рис. 5. Зависимость средней $\lambda_{\text{эф}}$ от пористости
о - по уравнениям (15) и (16),
+ - с учетом уравнения (17)

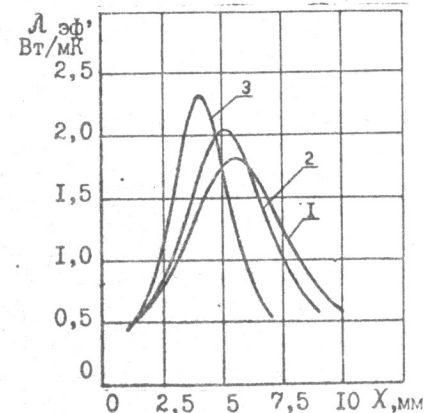


Рис. 4. Изменение $\lambda_{\text{эф}}$ по высоте твердого пористого блока CO_2
1 - $Q_0 = 1$ Вт, 2 - 2 Вт, 3 - 5 Вт

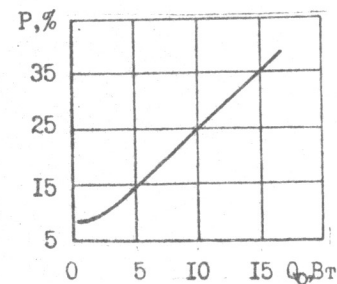


Рис. 6. Влияние холодопроизводительности Q_0 на пористость P твердого CO_2

Из вышеприведенных графиков, следует, что как максимальные, так и среднеинтегральные значения $\lambda_{\text{эф}}$ в несколько раз превышают удельную теплопроводность монолитного блока CO_2 .

Результаты численного эксперимента свидетельствуют об увеличении числа микрокапилляров с ростом тепловой нагрузки и, следовательно, с уменьшением высоты твердого пористого блока.

Пористость определяется как отношение суммарной площади микрокапилляров в среднем сечении твердого блока к площади поперечного сечения самого блока. Как видно из рис.6 пористость твердого блока возрастает с ростом нагрузки Q_0 от 5 до 35 %.

На основании приведенных выше теоретических и экспериментальных исследований были разработаны опытные образцы углекислотных БСО. Образцы разрабатывались по заданию ГАО АН СССР. Ниже приводятся технические характеристики опытного образца БСО.

Холодопроизводительность	максимальная.....	20 Вт
	номинальная.....	2.5 Вт

Температура термостатирования при номинальной холодопроизводительности.....	200 К
-----------------------------------------------------------------------------	-------

Точность поддержания температуры.....	± 0.3 К
---------------------------------------	-------------

Время выхода на температуру 200 К, не более.....	300 с
--------------------------------------------------	-------

Масса CO_2 , потребляемая за время пуска, не более... ..	0.15 кг
-------------------------------------------------------------------	---------

Расход CO_2 в установившемся режиме.....	$2.8 \cdot 10^{-5}$ кг/с
---------------------------------------------------	--------------------------

Размеры НТК - диаметр 0.031 м, высота 0.030 м. Габариты и масса рефрижераторного блока - 0.130*0.150*0.200 м и 0.9 кг.

В дополнение к этим характеристикам укажем, что опытные образцы БСО работали устойчиво в диапазоне температур среды 303+243К и полностью удовлетворяли условиям технического задания.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный по литературным данным сравнительный анализ расчетных и экспериментальных тепловых характеристик углекислотных баллонно-сублимационных охладителей, в низкотемпературных камерах которых расположен пористый блок твердого хладагента, показал значительные, достигающие до 180 %, расхождения, подчеркивающие недостаточную надежность существующих методов расчета и необходимость уточнения математической модели.

2. Изучение структуры пористых блоков твердой углекислоты и водного льда, на границах которых происходят фазовые переходы жидкость-твердое тело-пар при различных давлениях, позволило установить, что она образована сквозными конусообразными микрокапиллярами, пронизывающими блок от зоны кристаллизации до зоны сублимации.

3. Разработанная математическая модель стационарных процессов теплопереноса в твердых хладагентах с упорядоченной капиллярно-пористой структурой, предполагает, что микрокапилляры подобны открытым тепловым трубам, и дает возможность установить влияние происходящих в микрокапиллярах процессов на теплофизические свойства твердого блока и, в частности, на его эффективную теплопроводность.

4. Установлено, что эффективная теплопроводность капиллярно-пористого блока твердого хладагента, возникающего и расположенного в НТК БСО, зависит от плотности теплового потока и в несколько раз превышает теплопроводность монокристаллического блока.

5. Экспериментальные исследования опытных образцов углекислотных БСО позволили установить многофункциональный характер капиллярно-пористого блока и НТК, сочетающих свойства теплообменника, регулируемого дросселя и теплообменника нагрузки.

6. Установленная связь между тепловым потоком, толщиной твердого блока и конструктивными параметрами НТК позволяет определить критические тепловые нагрузки и максимальную холодопроизводительность охладителя.

7. Экспериментальное исследование температурных полей, тепловых и расходных характеристик НТК углекислотных БСО позволило определить их технические возможности и рекомендовать области применения, а их сравнение с расчетными зависимостями показало удовлетворительное совпадение, что подтверждает возможность использования разработанной математической модели для расчета подобных установок.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Баглюк В.П., Дворницкий А.П., Роженцев А.В. Баллонный сублимационный охладитель // Приборы и техника эксперимента. - 1989 - № 6 - С. 12.
2. Баллонный-сублимационный охладитель / В.П. Баглюк, А.П. Дворницкий, А.В. Роженцев, А.А. Себов // Вопросы радиотехники. Сер. ОВР(ТРО): Науч. техн. сб. - 1989. - Вып. 12. - С. 27-33. (ДСП).
3. Белозорова Л.А., Котиков Ю.Д., Роженцев А.В. Устройство термостабилизации катода фотоэлектронных умножителей // Приборы и техника эксперимента. - 1986 - № 3 - С. 11.
4. Математическая модель баллонного сублимационного охладителя / В.П. Баглюк, А.П. Дворницкий, А.В. Роженцев, А.А. Себов // Холодильная техника и технология. - Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1989. - Вып. 48 - С. 32-34.
5. Роженцев А.В. Теплоперенос в пористых хладагентах сублима-

ционных охладителей // Вопросы радиоэлектроники. Сер. СВР (РТТО): Науч.-техн. сб.- 1990.- Вып. 12.- С. 93-101.

Роженцев А.В. Тепломассоперенос в твердых теплохладносителях с меняющейся под воздействием граничных условий пористой структурой // Тез. докл. IV Всесоюзной конф. молодых исследователей "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики".- Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР.- 1991.- С. 194-195.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); C - массовая теплоемкость, Дж/(кг·К); α - линейный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T - температура, К; S , S_k - площади поперечного сечения камеры БСО и микрокапилляра, м²; q_v - интенсивность внутренних источников теплоты, Вт/м³; ν - кинематический коэффициент вязкости, м²/с; μ - молекулярная масса хладагента, кг/моль; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); p_0, p_1, p_2, p_3 - давление хладагента в сечениях $x=0$, $x=N+L_1$, $x=N+L_1+L_2$, $x=N+L_1+L_2+L_3$, соответственно, Па; L , N , d_1 , d_2 , d_3 , L_1 , L_2 , L_3 - соответственно высота камеры БСО, жидкой фазы хладагента, диаметры и длины участков микрокапилляра, м; $Q_c, \sum Q_{\text{ТП}}$ - соответственно холодопроизводительность и суммарный теплоприток в БСО, Вт; $i_{\text{вх}}, i_{\text{вых}}$ - удельная энтальпия хладагента на входе и выходе из камеры БСО, Дж/кг; P - пористость твердого блока.

ИНДЕКСЫ

t - твердая фаза; $ж$ - жидкая фаза; $ос$ - окружающая среда; $с$ - сублимация; $кр$ - кристаллизация; $с$ - стенка; $эф$ - эффективное значение величины.