

Автореферат
С 30

Проф. Гушаку Ч.В.
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

СЕМЕРХАНОВ Зефар Шамильевич

УДК 536.421.4

ТЕПЛОТДАЧА НА УЧАСТКАХ КОНДЕНСАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ
И РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Специальность 05.14.05 – теоретические основы теплотехники

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

XV 988
Інститут холода
ОНАХТ
бібліотека

Одесса-1987

Работа выполнена в Одесском технологическом институте холодильной промышленности.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Смирнов Г.Ф.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Иванов О.П.
кандидат технических наук
Гниличенко В.И.

Ведущая организация: указана в решении Совета

Защита состоится "23" декабря 1987 г. в 11⁰⁰ часов
на заседании специализированного Совета К.068.27.01 при Одесском
технологическом институте холодильной промышленности по адресу:
270057, Одесса, ул. Петра Великого, 1/3, ученым Совет ОТИП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИП.

Автореферат разослан " " 1987 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

Р.К.Никульшин

Исх. №

- 3 -

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Достоинства тепловых труб (ТТ) обусловили перспективу их применения при охлаждении аппаратуры в качестве высокоэффективных теплопроводов.

Требования к функциональным характеристикам теплопроводов на основе ТТ привели к необходимости применения ТТ с минимально возможными длинами участков теплопровода. При этом полное термическое сопротивление ТТ определяется в основном термическим сопротивлением зоны конденсации.

Среди капиллярных структур (КС), применяемых в ТТ, заметными преимуществами обладают металлические сетки, используемые в ряде серийно выпускаемых ТТ. Несмотря на большой объем исследований процессов и характеристик ТТ с сеточными КС, необходимые сведения по теплоотдаче на участках теплосброса не определены и противоречивы. Отсутствуют систематические исследования и рекомендации по закономерностям теплообмена при конденсации на сеточных КС, известны исследования внутренних характеристик процесса, раскрывающие механизм явлений и модели, объясняющие установленные закономерности. Аналогичная ситуация сложилась для перспективных гофрированных КС, выполненных из металлической фольги.

Расширение области применения ТТ приводит к новым схемам использования КС для организации транспорта теплоносителя. Перспективным следует считать использование КС для обеспечения циркуляции рабочих веществ в безнасосных схемах холодильных машин (например, в абсорбционно-диффузионных), что позволяет создавать автономные компактные генераторы холода. Однако опыт создания таких устройств неизвестен.

Изложенное определяет актуальность настоящей диссертации.

Цель работы: определение закономерностей теплообмена при конденсации на сеточных и гофрированных КС, применительно к условиям работы ТТ, для совершенствования этих устройств и теплопроводов на их основе и определение возможности создания конструкций ТТ, реализующих цикл абсорбционно-диффузионной холодильной машины (АДХМ) в компактных генераторах холода.

Научную новизну составили следующие основные результаты: экспериментальные данные по теплообмену при конденсации на сеточных, артериально-сеточных и гофрированных КС; результаты экспериментальных исследований теплообмена пр.

конденсации на поверхностях, покрытых "арочными" КС, интенсифицирующими теплоотдачу;

разработка и экспериментальные исследования макета ТТ, в котором реализован цикл АДХМ - "холодильной" ТТ (ХТТ);

физические и математические модели, описывающие закономерности теплообмена при конденсации на поверхностях, покрытых сеточными и сплошными гофрированными КС.

Практическая ценность. Результаты исследований теплообмена при конденсации на КС были использованы: 1) при создании эффективных конструкций плоских ТТ с пониженными термическими сопротивлениями для обеспечения их серийного применения в системах обеспечения теплового режима аппаратуры. Испытания таких ТТ показали, что их термические сопротивления снижены, в сопоставлении с исходными образцами, в 1,5... 2 раза. Это обеспечило соответствующее снижение температуры функциональных элементов и повышение надежности их работы; 2) при создании эффективных теплопроводов на основе ТТ со сплошными гофрированными КС;

Научные положения.

1. Использование капиллярных сил при организации циркуляции жидкости в конструкции АДХМ позволяет обеспечить ее работоспособность при существенном изменении ориентации и обеспечить одновременное выполнение функций теплопереноса и генерации холода.

2. При конденсации на поверхностях, покрытых капиллярными структурами решающую роль в механизме процесса играет распределение потоков конденсата между внешней поверхностью КС и внутренними ее объемами, которое определяет толщину стекающей по внешней поверхности пленки. При этом полное термическое сопротивление переносу тепла определяется суммой термического сопротивления пленки и смоченной затопленной структуры, и поэтому рациональный путь интенсификации теплообмена связан с максимально возможным освобождением поверхности конденсации от элементов затопленной капиллярной структуры при сохранении заданных условий транспорта конденсата.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников ОТИХП (№ 50, 52, 53, 56 Одесса, 1980-1987 гг.); Республиканском семинаре "Интенсификация теплопередачи в конденсаторах парониспользующих установок" (Киев, 1985 г.); Международной школе-семинаре "Процессы тепло- и массообмена при фазовых превращениях и в двухфазных потоках" (Минск, 1985 г.); выездных научно-технических совещаниях подсекции "Теп-

ловые трубы" Научного совета по комплексной проблеме "Теплофизика и теплоэнергетика" АН СССР (Одесса, 1985, 1987 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 3 авторских свидетельства.

Автор защищает: 1) результаты экспериментальных исследований теплообмена при конденсации на сеточных, артериально-сеточных и гофрированных КС; 2) физические модели, описывающие закономерности теплообмена при конденсации на сеточных и гофрированных КС; 3) рекомендации по конструированию зон тепловода низкотемпературных ТТ; 4) конструкции ТТ, в которых реализован цикл АДХМ; 5) результаты экспериментальных исследований макета "холодильной" ТТ - генератора холода.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, выводов и предложений. Работа изложена на 190 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 63 названий, приложение на 27 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ известных работ, посвященных проблемам использования ТТ в системах обеспечения теплового режима аппаратуры. Рассмотрено применение регулируемых и нерегулируемых ТТ для охлаждения теплонагруженных элементов и блоков. Показана перспективность использования ТТ для разработки СОТР при повышении плотности монтажа тепловыделяющих элементов, обеспечения удобства сборки, ремонтопригодности, увеличении плотности теплового потока, связанных с микроминиатюризацией.

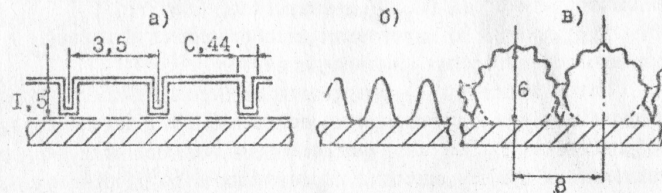
Рассмотрены схемы СОТР при наличии в составе элементов работающих при температурах окружающей среды или ниже ее. Показана возможность использования в этих случаях конструкций, реализующих цикл АДХМ.

Проведен анализ работ, посвященных процессам конденсации на профилированных поверхностях и поверхностях ТТ, покрытых КС. Показано отсутствие надежных экспериментальных данных и зависимостей для расчета интенсивности теплообмена при конденсации на КС, как традиционных, так и перспективных, применяемых в ТТ.

На основании анализа литературных данных обоснованы задачи исследований.

Во второй главе приведено описание экспериментального стенда для исследования ТТ, макета ТТ, реализующего цикл АДХМ, методик

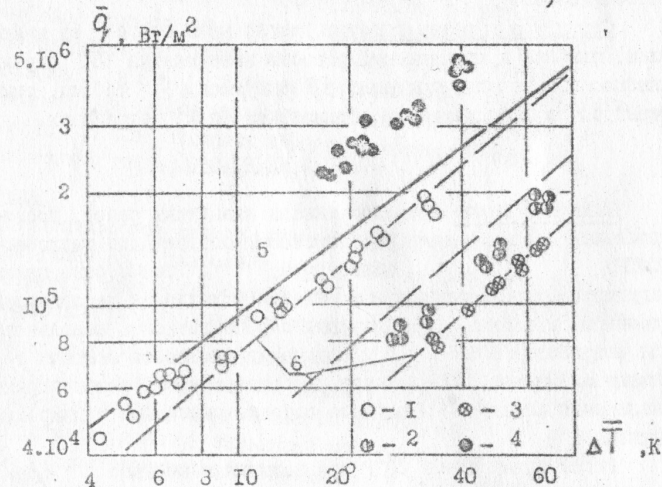
Внешний вид исследованных КС



а) - артериально-сетчатая КС с пристенным слоем сетки;
б) - гофрированная КС; в) - "арочная" КС

Рис. 1

Теплообмен при конденсации на гофрированных КС, $\beta = 15^\circ$



1 - гофр; медь, $m = 0,5$; 2 - гофр, нержавеющая сталь, $m = 0,5$; 3 - гофр, нержавеющая сталь, $m = 0,3$; 4 - "арочная" КС; 5 - расчет для поверхности без КС; 6 - расчет по (9)

Рис. 2

проведения опытов и обработки результатов экспериментов. Опыты на ТТ с перспективными КС проводились на стенде, который включал водной контур охлаждения, схему подачи и измерения мощности, подводимой к ТТ, систему измерения температур. На рис.1 показаны внешний вид и размеры перспективных КС, использовавшихся в исследованных ТТ, в табл.1 - их характеристики, а в табл.2 - параметры ТТ и условия проведения опытов.

На рис.3 приведены результаты опытов по определению интенсивности теплообмена в зоне конденсации ТТ с артериальными сетчатыми КС.

На рис.4 приведена принципиальная схема "холодильной" ТТ, которая работает следующим образом: при подводе тепла к генератору водоаммиачный раствор испаряется и по каналам 5 попадает в зону дефлегмации, где происходит конденсация паров воды. Очищенный пар аммиака поступает в зону конденсации, конденсируется и по КС поступает в испаритель. Аммиак, испаряясь, охлаждает объект и с водородом, циркулирующим между абсорбером и испарителем, по каналу 4 поступает в абсорбер. Сюда же, из дефлегматора по КС поступает вода. Вода абсорбирует пары аммиака, тепло абсорбции отводится в окружающую среду. Образовавшийся водоаммиачный раствор по КС поступает в генератор, а водород по каналу 3 - в испаритель.

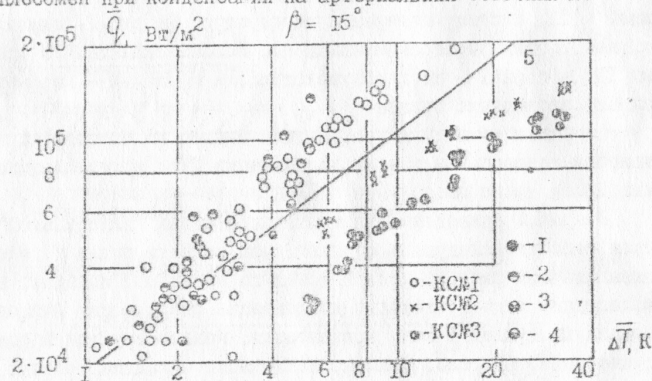
На рис.4 приведен профиль температур по длине ХТТ вдоль верхней и нижней образующих. Опыты проводились при трех объемах заправки водоаммиачным раствором - 134, 113 и 63 см³ с массовой концентрацией аммиака $\xi = 25\%$ при температуре охлаждающей воды 280...288 К, мощности подводимой к генератору 200 ÷ 500 Вт и углах наклона 34, 49, 74 и 90 градусов к горизонту. Предложенная конструкция ХТТ, в отличие от традиционной схемы АДХМ, сохраняет работоспособность при значительных углах наклона.

На рис.5 приведены результаты опытов по определению максимальной холодопроизводительности ХТТ при различных углах наклона и мощностях подводимых к генератору. Коэффициент теплоиспользования $\varphi_T = Q_o / W_r$ при этом составлял 0,005 ÷ 0,012.

Как показали проведенные эксперименты, объем заправляемого раствора (в диапазоне 134...113 см³) не оказывает влияния на характеристики макета. В то же время, уменьшение объема раствора до уровня, при котором он находился лишь в КС абсорбера и генератора (~ 20 см³), полностью нарушало работоспособность ХТТ. Повышение температуры охлаждающей воды до 291 ÷ 293 К также приводило к исчезновению положительного эффекта.

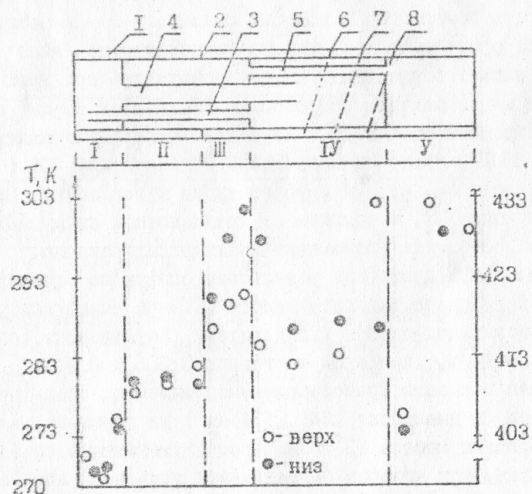
При работе макета наблюдались пульсации температур стенки

Теплообмен при конденсации на артериальных сеточных КС



1, 2 - ТТ №3, $\beta=0^\circ$ и $\beta=90^\circ$; 3, 4 - ТТ №4, $\beta=0^\circ$ и $\beta=90^\circ$;
5 - расчет для поверхности без КС

Рис. 3



а - схема ХТТ; 1 - КС; 2 - перегородка в КС; 3, 4 - подъемный и опускной каналы; 5 - паровой канал; 6, 7, 8 - уровни раствора при $V = 124, 113, 63 \text{ см}^3$; I - испаритель; II - конденсатор; III - дефлегматор; IV - абсорбер; V - генератор.
б - профиль температур по длине ХТТ

Рис. 4

Таблица 1

Параметры КС				
Гофрированные КС				
Модуль m	Высота, h_r , мм	Шаг, t, мм	Высота, удержания, мм	Эквивалентный диаметр, d_e мм
0,5	1,0	1,68	31	$0,95 \cdot 10^{-6}$
0,3	0,56	0,85	49	$0,85 \cdot 10^{-6}$
Артериальные сеточные КС				
КС № 1		КС № 2		КС № 3
Параметры артериальной КС		2 слоя сетки с $Q = 71 \text{ мкм}$		
Параметры пристенного слоя сетки		40 мкм		71 мкм

Таблица 2

Характеристики ТТ		
ТТ с гофрированными КС		
	ТТ № 1	ТТ № 2
Длина ТТ, мм	210	210
Диаметр ТТ, мм	10x1	10x1
Длина зоны конденсации, мм	60	60
Модуль КС	0,3	0,5
Теплоноситель	вода	
Материал корпуса и КС	медь	
Ориентация, град	$0^\circ; +15^\circ$	$0^\circ; +15^\circ$
ТТ с артериальными сеточными КС		
	ТТ № 3	ТТ № 4
Размеры ТТ, мм	215x15x3,5	215x15x3,5
Длина зоны конденсации, мм	70	
Тип КС	КС № 1	КС № 2
Материал корпуса и КС	нержавеющая сталь	
Теплоноситель	вода	
Ориентация, град	$0^\circ; +90^\circ$	

макета на различных участках с периодом $20 \div 25$ секунд. Максимальная амплитуда пульсаций - до $13 \div 15$ К отмечалась в дефлегматоре. В испарителе амплитуда колебаний не превышала 0,5 К. Пульсации температур при этих уровнях заправки раствором вызывались подачей из генератора в дефлегматор порций горячего раствора.

Исследования ХТТ проводились в лаборатории ОТИП им.М.В.Ломоносова совместно с О.Г.Бурдо и А.С.Титловым.

В третьей главе приведено описание экспериментального стенда для исследования закономерностей теплообмена при конденсации на поверхностях с сеточными и гофрированными КС. Изложены сетодики проведения опытов и обработки результатов экспериментов.

Опыты проводились на стенде, схема которого приведена на рис.6. Поверхностью конденсации служила никелевая пластина размерами 30×40 мм. Температура стенки пластины, входа и выхода охлаждающей воды измерялись с помощью медьконстантановых термопар диаметром 0,05 мм. Пластина с помощью мембраны из нержавеющей фольги закреплялась в герметичном корпусе, который помещался на поворотных стойках внутри рабочей камеры с теплоносителем, находившемся в состоянии насыщения. Камера снабжена 5-ю иллюминаторами для визуальных наблюдений. Образцы КС, в виде полос шириной 30 мм, закреплялись на поверхности теплообмена с помощью прижимного устройства. К нижнему торцу КС пристыковывались 3-4 слоя сетки с $\alpha = 180$ мкм для отвода конденсата с поверхности теплообмена.

Нижний конец сеточного отвода помещался в сосуд постоянного уровня, что позволяло стабилизировать условия отвода конденсата. Тепловой поток, подводенный к охлаждаемой пластине при конденсации на образцах КС, определялся по нагреву и расходу охлаждающей воды. В качестве теплоносителя в опытах использовалась вода при температуре насыщения $T_s = 373$ К и давлении насыщения $P_s = 9,81 \cdot 10^4$ Па, при угле наклона охлаждаемой пластины $\beta = 10$ и 15 градусов к горизонту.

Исследовались простые, одно- и многослойные, сеточные КС выполненные из нержавеющей стали с размерами ячеек $\alpha = 71$ мкм и $\alpha = 180$ мкм, а также гофрированные и артериальные КС, параметры которых приведены в табл.1. На рис.7 приведены результаты экспериментальных исследований теплообмена при конденсации на наклонной поверхности, покрытой сеточной КС. Видно, что наличие КС на поверхности теплообмена снижает интенсивность теплообмена по сравнению с поверхностью без КС. Это снижение пропорционально толщине наложен-

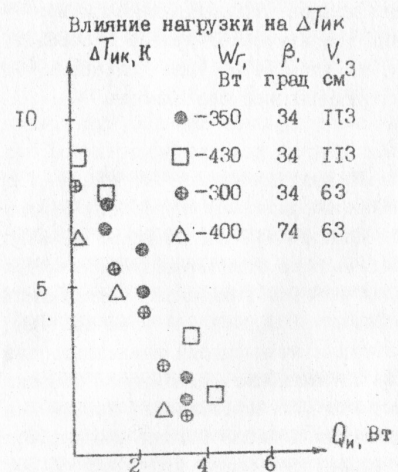
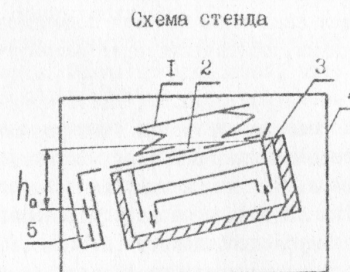


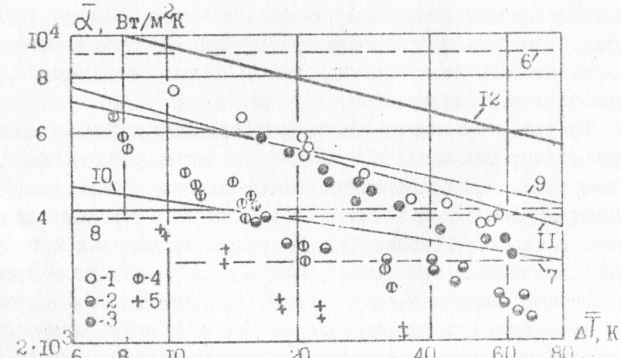
Рис.5



1 - прижим; 2 - КС; 3 - охлаждаемая пластина; 4 - камера; 5 - сосуд постоянного уровня

Рис.6

Теплоотдача при конденсации на сеточных КС



1, 2 - 1 и 3 слоя с $\alpha = 71$ мкм; 3 - 1 слой с $\alpha = 180$ мкм; 4, 5 - 3 слоя с $\alpha = 180$ мкм при $h_0 = 65$ мм и 15 мм; 6, 7, 8 - расчет по (1) для 1-го и 3-х слоев с $\alpha = 71$ мкм и 1-го слоя с $\alpha = 180$ мкм; 9, 10, 11 - расчет по (3) для 1-го и 3-х слоев с $\alpha = 71$ мкм и 1-го слоя с $\alpha = 180$ мкм; 12 - расчет для поверхности без КС

Рис.7

ной сеточной КС. Также заметно, что наклон экспериментальных кривых несколько отличается от наклона теоретической кривой Нуссельта для наклонной плоской поверхности. На этом же рисунке приведены линии, соответствующие расчету по традиционной зависимости

$$\alpha = \lambda_s / \delta_{\text{ф}} \quad (I)$$

Хорошо заметно, что опытные данные ни по характеру зависимости, ни по величине не согласуются с расчетом по (I). Это позволяет предположить, что интенсивность теплообмена зависит не только от эффективной теплопроводности насыщенной КС, но и от таких факторов, как заглубление жидкости в поры КС или наличие стекающей пленки жидкости на поверхности КС, при превышении ее гидравлической пропускной способности.

Как известно, при $P_g > 1000$ Па термическое сопротивление процесса определяется, в основном, термическим сопротивлением пленки конденсата, находящейся на теплообменной поверхности. Влияние условий отвода конденсата на интенсивность теплообмена при конденсации на трехслойной сеточной КС с $\alpha = 180$ мкм показано на рис.8. Опыты проводились при двух уровнях жидкости в сосуде постоянного уровня - 65 и 15 мм от верхнего края охлаждаемой пластины. Видно, что понижение уровня в сосуде постоянного уровня от 15 мм до 65 мм приводит к росту коэффициентов теплоотдачи. При этом визуально наблюдалось потемнение поверхности образца КС, что свидетельствовало об исчезновении пленки конденсата с поверхности сетки и заглублении жидкости в поры сетки.

На рис.3 приведены результаты экспериментальных исследований сеточных артериальных КС, внешний вид которых приведен на рис.1 а. Видно, что наличие пристенного слоя сетки у артериальной КС снижает интенсивность теплообмена по сравнению с поверхностью без КС. При этом, как и в случае простых сеточных КС, интенсивность теплообмена возрастает при уменьшении толщины пристенного слоя сетки. Результаты, полученные для КС № 3 (пристенный слой сетки с $\alpha = 71$ мкм) близки к данным, полученным для однослойной сеточной КС с тем же размером ячейки. Результаты, полученные для КС № 1 (без пристенного слоя сетки) показывают возможность интенсификации процесса по сравнению с поверхностью без КС.

Можно полагать, что термическое сопротивление процесса в основном определяется ситуацией в пристенной области. При использовании КС № 1, образующаяся пленка конденсата стягивается к местам контакта стенки с артерией и по последней отводится за пределы участка

теплоотвода, т.е. в данном случае происходит конденсация на гладкой поверхности при постоянном отводе конденсата. При этом средняя толщина пленки жидкости, существующей на поверхности, меньше средней толщины пленки жидкости в случае поверхности без КС.

Для КС № 2 и КС № 3 хорошо заметен перегиб экспериментальных кривых при больших температурных напорах. Можно предположить, что при малых температурных напорах (малых массовых расходах конденсата), когда нет пленки конденсата на поверхности пристенного слоя сетки, интенсивность теплообмена определяется закономерностями для простой сеточной КС. При больших температурных напорах, когда на поверхности пристенного слоя сетки появляется пленка стекающего конденсата, последняя, за счет капиллярных сил, отводится в артерию. При этом интенсивность теплообмена определяется термическим сопротивлением насыщенного жидкостью пристенного слоя сетки и пленкой конденсата, отводимой в артерию. Характер экспериментальной кривой указывает на то, что основной вклад в термическое сопротивление вносит насыщенный теплоносителем пристенный слой сетки. Не исключено также заполнение всего парового канала или его части жидкостью.

На рис.3 также приведены результаты, полученные из опытов на ТТ с такими же КС. Видно, что в исследованном диапазоне согласование результатов, полученных из опытов на ТТ и на макете участка конденсации, удовлетворительное, хотя и заметна более сильная зависимость интенсивности теплообмена от температурного напора для результатов, полученных на ТТ.

На рис.2 приведены результаты экспериментальных исследований по конденсации на гофрированных КС (ГКС). Видно, что интенсивность теплообмена зависит от высоты гофра и свойства его материала. Для ГКС, выполненных из нержавеющей стали, интенсивность теплообмена выше у гофров с меньшей ($h_f = 0,56$ мм) высотой. Для гофров равной высоты ($h_f = 1,0$ мм) интенсивность теплообмена в 2 раза выше для ГКС, выполненной из меди, чем для ГКС - из нержавеющей стали. Как показали визуальные наблюдения, конденсация происходила в основном на выступах гофров, а во впадинах образуется ручьево течение конденсата. Внутренние полости гофров залиты конденсатом. Следовательно, ГКС выполняет роль своеобразного оребрения поверхности.

Опыты, проведенные с образцами ГКС, показали необходимость интенсификации теплообмена в зоне конденсации ТТ с ГКС. В связи с этим была предложена КС, условно названная "арочной" (рис.1), результаты испытаний которой представлены на рис.2. Образец такой

КС, изготовленный из медной ГКС высотой 0,56 мм, имел ширину 30 мм и длину одной полосы 20 мм. Из представленных опытных данных видно, что "арочная" КС позволяет увеличить интенсивность теплообмена примерно в 1,5 раза по сравнению с гладкой поверхностью без КС и в 2 раза по сравнению с медной КС с высотой гофра 1,0 мм. Как показали визуальные наблюдения, конденсация пара происходила на поверхности охлаждаемой пластины, а конденсат стягивался к местам контакта арки с пластиной и стекал вдоль основания арок. При движении конденсата вдоль охлаждаемой поверхности, от одной полосы образца к другой, происходило заполнение жидкостью канала, образованного смежными дугами арок. Таким образом происходил постоянный отвод конденсата с поверхности теплообмена.

Экспериментальные результаты, полученные из опытов на "арочных" и артериальных КС позволяют утверждать, что организация КС, при которой конденсация пара происходит на охлаждаемой поверхности без КС, а конденсат затем отводится под действием капиллярных сил в специально организованные каналы, по которым эвакуируется из зоны теплоотвода, позволяет интенсифицировать процесс на коротких плоских участках конденсации. В тех случаях, когда пристенный слой КС необходим, он должен иметь минимально возможную толщину.

В четвертой главе приведен анализ процесса конденсации на простых сеточных и гофрированных КС.

На основании экспериментальных данных и визуальных наблюдений сформулирована приближенная физическая модель процесса конденсации на наклонной плоской поверхности, покрытой сеточной КС. Основные положения модели:

конденсируется сухой насыщенный неподвижный пар;

интенсивность теплоотдачи определяется теплопроводностью от границы раздела фаз к охлаждаемой поверхности;

в общем случае конденсат может двигаться как в КС, так и одновременно в КС и в пленке жидкости, покрывающей ее;

движения жидкости в КС и в стекающей пленке рассматриваются как независимые и происходят под действием сил тяжести в предположении, что отсутствует перемешивание жидкости в поперечном сечении; термическое сопротивление на участке конденсации можно рассматривать как сумму термических сопротивлений пленки и насыщенной КС с учетом изменения толщины пленки конденсата в зависимости от условий конденсации и соотношений между расходами жидкости в пленке, в КС и полным расходом конденсата.

На основании изложенных допущений в диссертации получено вы-

ражение для координаты выхода пленки конденсата на поверхность КС

$$x_0 = \frac{\kappa \delta_{\phi}^2}{\lambda_g (T_s - T_{ct})} \cdot \frac{\epsilon \rho' g \sin \beta}{\eta'} \quad (2)$$

и выражение для толщины стекающей пленки жидкости

$$\delta^4 + \frac{4}{3} \frac{\lambda'}{\lambda_g} \delta_{\phi} \delta^3 = \frac{(T_s - T_{ct}) \eta'}{\epsilon \rho' g \sin \beta} (x - x_0) \quad (3)$$

Результаты расчетов по предлагаемой приближенной модели, в сопоставлении с опытными данными, приведены на рис. 7. Определенное согласование расчетных и экспериментальных величин свидетельствует о правомерности исходных физических представлений о механизме процесса. Недостаточно хорошее количественное согласование связано в значительной мере с известной неопределенностью таких параметров КС как λ_g , κ , а также распределением толщины КС, зазоров между КС и поверхностью теплообмена и т.п.

Анализ процесса конденсации на ГКС, приведенный в работе, основан на следующих допущениях:

реальный профиль гофра может быть заменен эквивалентным по периметру и высоте треугольным;

конденсация происходит на выступах гофров и на поверхности речья во впадине;

конденсат стекает с выступов гофров под действием сил тяжести;

течение конденсата по выступу гофра и во впадине ламинарное; свободная поверхность жидкости во впадине имеет нулевую кривизну;

внутренняя полость гофра заполнена конденсатом и в теплообмене не участвует.

Рассмотрение конденсации пара на выступе гофра, как на наклонном неизотермическом ребре, приводит к следующим уравнениям для толщины стекающей по ребру пленки конденсата и распределению температур в ребре

$$\frac{d(\delta^4)}{d\ell_1} = - \frac{4\vartheta}{A}; \quad (4)$$

$$\frac{d^2\vartheta}{d\ell_1^2} = B \frac{\vartheta}{\delta}, \quad (5)$$

$$\text{где: } B = \frac{\lambda'}{\lambda_m \delta_m}; \quad A = \frac{\epsilon \rho' g \sin \varphi_0}{\eta' \lambda'}; \quad \vartheta = T_s - T_m.$$

Решениями системы являются

$$\delta = \frac{B}{42} \left\{ \left[\frac{\partial_0}{2A} \left(\frac{42}{B} \right)^4 \right]^{1/2} - l_1 \right\}^2; \quad (5)$$

$$\partial = 2A \left(\frac{B}{42} \right)^4 \left\{ \frac{\partial_0}{2A} \left(\frac{42}{B} \right)^4 - l_1 \right\}. \quad (6)$$

Этими уравнениями определяются условия натекания конденсата с боковой поверхности одиночного гофра в одиночную канавку. Получено уравнение для определения глубины ручьевого течения h в зависимости от продольной координаты

$$C_1 D_1 \int_0^h \frac{h^3 dh}{D_2 (D_3 + h/\cos \varphi/2)^6} + C_2 D_4 = \int_0^z dz. \quad (8)$$

Определяя значение глубины ручья в конце охлаждаемого участка получено выражение для среднего по пластине коэффициента теплоотдачи

$$\bar{\alpha} = \frac{c' g \sin \beta}{8 \nu'} \cdot \frac{h_L \operatorname{ctg} \varphi/2}{(1 + \sin \varphi/2)^2} \cdot \frac{b}{t}. \quad (9)$$

В физическую модель введены две эмпирические константы $C_1 = 0,12$ и $C_2 = 56$, полученные из обработки экспериментальных данных.

Результаты расчетов по предложенной модели, приведены на рис. 2. Удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных величин свидетельствует о правильности основных физических представлений, положенных в основу приближенной модели процесса конденсации на плоской наклонной поверхности, покрытой ГКС.

Результаты экспериментальных и аналитических исследований позволили сформулировать основные выводы по диссертационной работе.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные исследования макета, реализующего цикл АДХМ, показали принципиальную возможность создания компактного автономного генератора холода на основе ТТ, малочувствительного к ориентации в поле сил тяжести - "холодильной" ТТ.

2. Работоспособность опытного образца ХТТ сохраняется при наклоне до 34° к горизонту. Его работа сопровождается колебаниями температур с периодом $20 \div 25$ секунд. Амплитуда колебаний в

xv 988

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
Библиотека

зоне испарения не превышает $0,5$ К. Максимальная холодопроизводительность составляет $3 \div 5$ Вт, а коэффициент теплоиспользования находится на уровне $0,005 \div 0,012$.

3. Закономерности теплоотдачи при конденсации на поверхности, покрытой сеточной КС, определяются в соответствии с предложенной физической моделью суммированием термических сопротивлений смоченной КС и пленки жидкости, стекающей по ее поверхности.

Поэтому эффективный путь интенсификации теплообмена на поверхностях, покрытых КС состоит в таком максимальном "освобождении" поверхности от пористой структуры, при которой удовлетворяются ограничения по транспорту жидкости.

4. При конденсации на ГКС интенсивность теплообмена зависит от высоты гофра и коэффициента теплопроводности его материала. ГКС высотой $0,56$ мм из нержавеющей стали обеспечивает большие плотности теплового потока при конденсации, чем ГКС высотой $1,0$ мм. При равной высоте гофров медная ГКС обеспечивает более высокие значения плотности теплового потока, чем ГКС из нержавеющей стали.

5. Закономерности теплоотдачи при конденсации на поверхности, покрытой ГКС, объясняются предложенной моделью в соответствии с которой основной вклад в теплоотдачу вносит процесс переноса тепла через пленку конденсата по стенке гофра как по ребру к поверхности основания. На интенсивность процесса влияет затопление внешних каналов гофра.

6. Перспективными конструкциями КС для участков конденсации ТТ являются артериально-сеточные структуры без пристенного слоя сетки и "арочная" КС, позволяющие в $1,2 \div 2$ раза снизить соответствующие термические сопротивления ТТ.

7. Применение предлагаемых рекомендаций по конструированию КС на участке конденсации в серийных образцах плоских ТТ позволило в $1,5 \div 2$ раза снизить их термическое сопротивление, соответствующим образом улучшить тепловой режим и надежность охлаждаемых изделий.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.с. 769267 СССР. Тепловая труба / Чайковский В.Ф., Смирнов Г.Ф., Бурдо О.Г., Семерханов З.Ш. (СССР). -1980.-Вал. № 37.
2. А.с. 720282 СССР. Тепловая труба / Чайковский В.Ф., Смирнов Г.Ф., Бурдо О.Г., Семерханов З.Ш. (СССР). -1980.-Вал. № 9.
3. Смирнов Г.Ф., Бурдо О.Г., Семерханов З.Ш. Абсорбцион-

но-диффузионное холодильное устройство на основе тепловой трубы //Холодильная техника и технология.-1981. - № 32.-С.24-28.

4. Бурдо О.Г., Семерханов З.Ш., Титлов А.С. Новые конструкции теплоиспользующих генераторов холода //II-я Всесоюзная научно-техническая конференция по холодильному машиностроению: Тез.докладов, Одесса, 1982.-М.:ЦНТИХИМНЕФТЕМАШ.-1982.-С.132.

5. Афанасьев Б.А., Жигалов В.Г., Семерханов З.Ш., Силинский А.Л., Смирнов Г.Ф. Теплообмен при конденсации и парообразовании в тепловых трубах с гофрированными фитилями //Тепломассообмен-УП. Т.IV, Ч.I, Минск, 1984.-С.

6. А.с. 1176165 СССР. Пластинчатая теплообменная поверхность /Смирнов Г.Ф., Афанасьев Б.А., Семерханов З.Ш. (СССР).-1985.-Бюл. № 32.

7. Семерханов З.Ш., Смирнов Г.Ф., Афанасьев Б.А. Теплоотдача при конденсации на сетчатых капиллярных структурных тепловых трубах //ИЖ.-1987.-Т.53, № 2.-С.237-342.

Условные обозначения

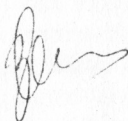
q - плотность теплового потока; T - температура; A - размер ячейки; h_0 - уровень жидкости относительно поверхности теплообмена; δ - толщина; α - коэффициент теплоотдачи; λ - коэффициент теплопроводности; ρ - плотность; ε - теплота парообразования; η - вязкость; β - угол наклона к горизонту; x, z - продольная координата; K - коэффициент проницаемости; φ - угол раскрытия гофра; b - ширина поверхности теплообмена.

$$D_1 = \frac{\rho' q \sin \beta}{2 \eta'} \cdot \frac{\operatorname{ctg} \varphi/2}{(1 + \sin \varphi/2)^2}; D_2 = \frac{28 A \lambda_m \delta_m (B)^4}{\varepsilon (42)};$$

$$D_3 = \left\{ \frac{\vartheta_0}{2A} \left(\frac{42}{B} \right)^4 \right\}^{1/2}; D_4 = \frac{2 \lambda \vartheta_0}{\varepsilon \operatorname{ctg} \varphi/2}.$$

И н д е к с ы

S - насыщения; $ст$ - стенка; $м$ - металлы; $э$ - эффективный; Φ - фитиль.



Ротапринт ОТХП г.Сдесса. Подписано и печати 17.II.87.
БР 02904. Объем 1,0 п.л. Тираж 100. Заказ 1215-87.