

Авторефер.
В49

проф. Гурману М.С.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

Виноградова Елена Петровна

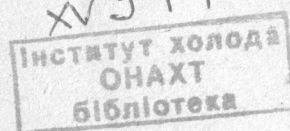
УДК 536.248.2

ТЕПЛООБМЕН И ПРЕДЕЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ
ПРИ ПАРООБРАЗОВАНИИ В ГОФРИРОВАННЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУРАХ
ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Специальность 05.14.05 – теоретические основы теплотехники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Одесса – 1988

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
холодильной промышленности.

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Шекриладзе И.Г.
к.т.н. Гниличенко В.И.

Ведущая организация: Московский ордена Ленина энергети -
ческий институт

Защита состоится "24" июня 1988г. в 11.00 часов на
заседании специализированного Совета К.068.27.01 при Одесском
технологическом институте холодильной промышленности по адресу:
270057, Одесса-57, ул.Петра Великого, 1/3, ученый Совет ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИХП.

Автореферат разослан "25" мая 1988г.

Ученый секретарь
специализированного Совета,
к.т.н., доцент

Р.К.Никульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Известны различные типы капиллярно -
пористых структур, широко применяемых в качестве фитилей тепло -
вых труб (ТТ). Для изготовления сеточных, спеченных, металло -
волоконистых структур требуется сложное оборудование, соблюдение
высокой точности технологии изготовления.

Предварительные исследования на тепловых трубах с гофриро -
ванной структурой из металлической фольги показали хорошие ха -
рактеристики: низкое термическое сопротивление $R_{\text{ТТ}}=0,04-0,16 \text{ К/Вт}$,
высокую максимальную теплопередающую способность, стабильность
параметров в работе при отрицательных углах наклона β вплоть до
 -90° . Существенное достоинство ТТ со сплошными гофрированными
фитилями - простота технологии изготовления, не требующая сложно -
го оборудования, высокая воспроизводимость параметров.

Данные по исследованию ТТ с гофрированными капиллярными
структурами (ГКС) ограничены, отсутствуют физические представле -
ния о происходящих в них процессах, нет рекомендаций по расчету
и проектированию таких ТТ. Они могут быть использованы для се -
рийного производства в качестве охлаждающих устройств аппарату -
ры и пр.

Изложенное определило актуальность настоящей диссертации.

Цель работы: изучение закономерностей теплообмена при паро -
образовании на поверхностях, покрытых гофрированными капиллярны -
ми структурами, и разработка на этой основе методов расчета и
проектирования тепловых труб с гофрированными фитилями.

Научную новизну составили следующие основные результаты:

- опытные данные по характеристикам тепловых труб с ГКС;
- экспериментальные результаты по теплообмену при парообра -
зованию в гофрированных фитилях;
- физические и математические модели теплоотдачи и предель -
ных тепловых потоков в тепловых трубах с ГКС;
- методики поверочного и конструкторского расчетов тепловых
труб с ГКС.

Практическая ценность. Результаты исследований парообразо -
вания в ГКС использованы при создании высокоэффективных теплоот -
водящих устройств на основе тепловых труб с гофрированными фити -
лями. Сформулированные в работе физические представления и мате -
матические модели процессов теплообмена и предельного теплового
потока позволили разработать методы расчета ТТ с ГКС для серий -

ного производства.

Научные положения. 1. Механизм теплообмена при парообразовании в гофрированных капиллярных структурах аналогичен таковому при кипении в щелевых каналах и характеризуется термическим сопротивлением микрослоя жидкости, образующегося при формировании паровых снарядов во внутренних каналах гофра.

2. Предельные тепловые потоки в тепловых трубах с гофрированными капиллярными структурами определяются двумя гидродинамическими пределами: первый из них проявляется при условии повышения сил сопротивления над капиллярными силами, а второй — при полном испарении жидкости из условных каналов, образованных профилем гофра, поверхностью нагрева и мениском границы раздела фаз.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных работников ОТИХП (1952-55, 57, г.Одесса, 1983-1986, 1988 гг.), на Республиканской конференции "Применение тепловых труб в народном хозяйстве" (г.Киев, 1984), на Международной школе-семинаре "Процессы тепло- и массообмена при фазовых превращениях и в двухфазных потоках" (г.Минск, 1985г.), в выездном научно-техническом совещании подсекции "Тепловые трубы" Научного совета по комплексной проблеме "Теплофизика и теплоэнергетика" АН СССР (2-8 сентября, г.Одесса, 1985г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ.

Автор защищает: 1) результаты экспериментальных исследований теплообмена при парообразовании на поверхностях, покрытых гофрированными капиллярными структурами; 2) результаты опытов по предельным тепловым потокам на поверхностях с ГКС, а также в тепловых трубах с гофрированными фитилями; 3) физические представления и математические модели теплоотдачи и предельных тепловых потоков в тепловых трубах с ГКС; 4) методики поверочного и конструкторского расчетов тепловых труб с ГКС; 5) результаты оптимального проектирования тепловых труб с гофрированным фитилем.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и приложений. Работа изложена на 163 стр. машинописного текста, содержит 27 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 60 названий, приложение на 28 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ закономерностей теплообмена и предельных тепловых потоков при парообразовании в капиллярно-пористых структурах различного типа: сеточных, металловолоконистых, напыленных и гофрированных, который показал преимущество использования гофрированных капиллярных структур в качестве фитилей ТТ. Имеющиеся в литературе данные по изучению характеристик ТТ с гофрированными структурами не дают полных представлений о протекающих в них процессах и не позволяют сформулировать методики инженерного расчета.

На основе анализа литературных данных обосновываются задачи исследования.

Во второй главе приводится описание экспериментальных стендов для исследования теплоотдачи и предельных тепловых потоков при парообразовании на модели с ГКС и на натурных образцах тепловых труб с гофрированными фитилями, а также методик исследования.

Моделирование теплообмена на поверхности с ГКС проводилось на экспериментальной установке, созданной в ОТИХП по методу теплового клина. На рис.1 показаны образцы гофрированных структур, использованных в экспериментах, а в таблице 1 даны их геометрические характеристики. В качестве теплоносителя использовалась вода при атмосферном давлении, исследования проводились в диапазоне тепловых нагрузок от 0 до 10^6 Вт/м².

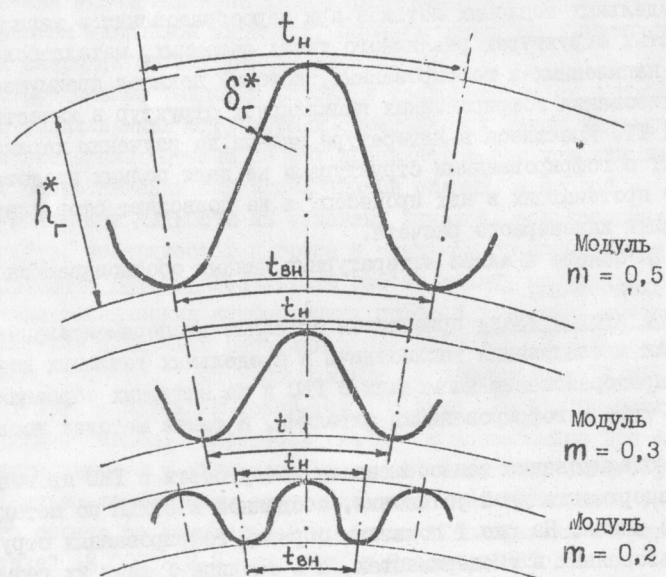
На рис.2 приводятся основные закономерности теплоотдачи при парообразовании на поверхности с ГКС для модулей $m = 0,2; 0,3$ и $0,5$, а в таблице 2 — опытные значения их предельных тепловых потоков.

Проведенный анализ опытных данных по интенсивности теплоотдачи α_{κ} на тепловом клине показал, что эта величина немонотонно зависит от модуля гофров m : сначала возрастая вплоть до

$m = 0,3$, а затем убывает. Кроме того, с ростом ширины гофров b интенсивность теплоотдачи возрастает. Как видно из табл.2, предельный тепловой поток уменьшается с ростом ширины гофров и возрастает с увеличением модуля гофра.

Экспериментальный стенд по изучению характеристик тепловых труб с ГКС включал водяной контур охлаждения рабочего участка — тепловой трубы с гофрированным фитилем, схему подачи и измерения мощности на испарителе ТТ, систему измерения температур. В опытах использовались три образца ТТ с ГКС, геометрические парамет-

Профили гофрированной структуры
в корпусе тепловой трубы



Масштаб 1:40

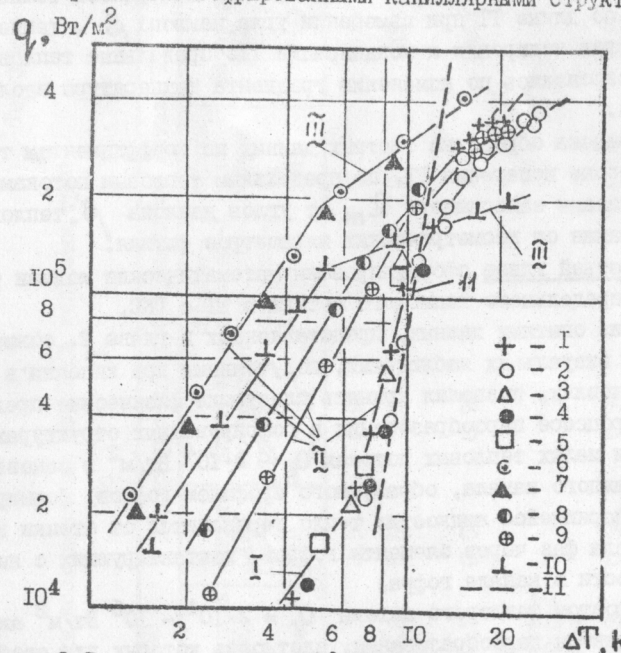
Рис. 1.

Таблица 1.

Геометрические характеристики образцов гофрированной
структуры

Модуль структуры m	Высота гофра $h_r^*, 10^{-3}$ м	Толщина металла $\delta_r^*, 10^{-3}$ м	Длина шага гоф- ров по пер мет- ру t/t_n в мм	Количество шагов по периметру t N_r
0,5	1,0	0,1	1,68/0,98	18
0,3	0,56	0,1	0,85/0,64	30
0,2	0,21	0,1	0,64/0,6	49

Закономерности теплоотдачи при парообразовании на
поверхности с гофрированными капиллярными структурами



Модуль $m=0,5$, нерж. сталь: 1 - $b=5,5$ мм; 2 - $b=10,2$ мм; 3 - $b=10,2$ мм; 4 - $b=40$ мм; 5 - медь, $b=40$ мм; модуль $m=0,3$, нерж. сталь, 6 - $b=20,7$ мм; 7 - медь, $b=20,7$ мм; 8 - нерж. сталь, $b=10,5$ мм; 9 - медь, $b=10,5$ мм; 10 - модуль $m=0,2$, медь, $b=19$ мм; 11 - кипение в свободном объеме.

Рис. 2.

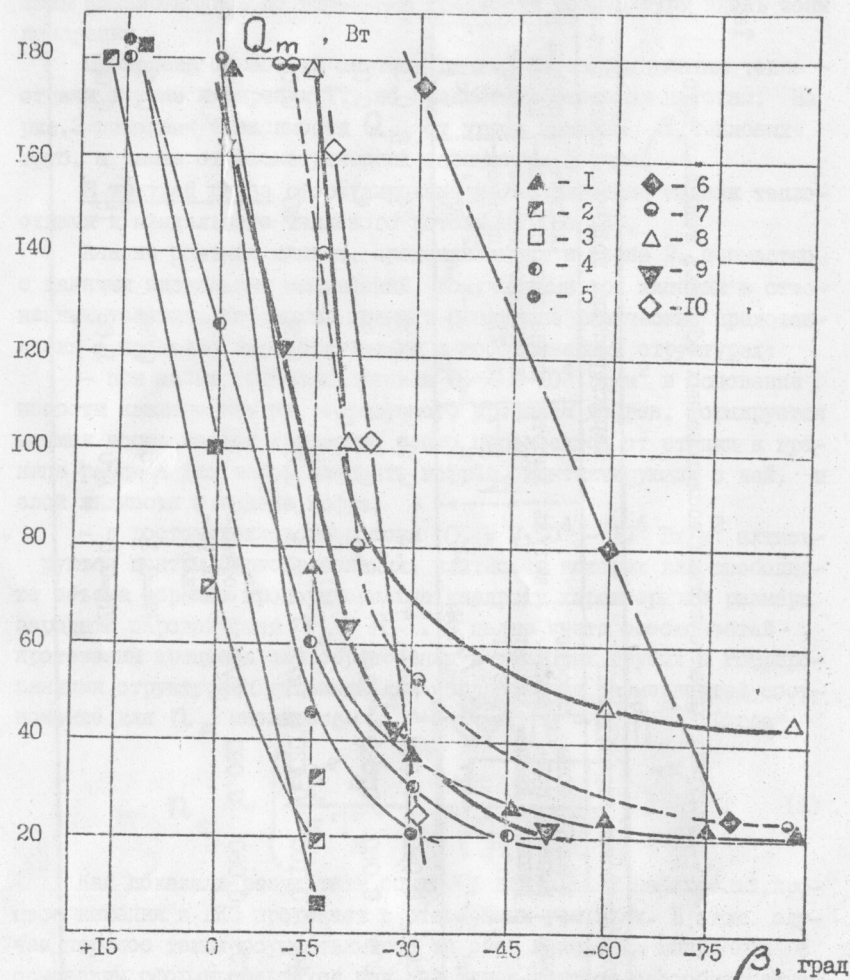
Таблица 2.

Предельные тепловые потоки $q_m, 10^4$ Вт/м² в опытах на тепловом
клизне

Модуль m	$d_2, 10^{-3}$ м	Ширина полос структуры b , мм			
		5.5	10.7	20.7	40
0,5	0,95	46	39; 46,0	32; 33	24
0,3	0,49	-	35; 38,6	28,5; 29,6; 31; 35	-
0,2	0,4	-	32	25	-

Номер исследо- вательно- го образ- ца ТТ	Геометрические параметры ТТ			Характеристики гофрированного биметалла ТТ						материал ТКС
	длина ТТ $L_{ТТ}, \text{ м}$	зона испа- рения $L_{ИП}, \text{ м}$	зона кон- денса- ции $L_{КД}, \text{ м}$	соотно- шение диамет- ров ТТ $d_{н}/d_{вн}$	модуль ТКС m	высота ТКС $h, 10^{-3}$	длина шага по периметру по ТТ $t_p, 10^{-3}, \text{ м}$	количе- ство ва- гов по перимет- ру ТТ $N_{ТТ}$	ширина полюс гофров $b, \text{ м}$	
№ 1	0,209	0,080	0,097	10/8	0,3	0,56	0,98	24	0,02	медь
	0,209	0,080	0,060	10/8	0,3	0,56	0,98	24	0,02	медь
№ 2	0,440	0,100	0,120	12/10	0,3	0,56	0,98	30	0,04	медь
№ 3	0,009	0,080	0,090	10/8	состав- ной ди- табель: $m=0,3$ $m=0,5$					медь
						0,56	0,98	24	0,02	медь
						1,0	1,68	15	0,02	медь

Зависимости предельных тепловых потоков
от углов ориентации β тепловой трубы



1 - образец ТТ №1; 2 - то же, №2 при температуре воды, охлаждающей конденсатор, $t_{вх} = 25^\circ\text{C}$; 3 - то же, №2 при $t_{вх} = 50^\circ\text{C}$; 4 - то же, №3 при $t_{вх} = 25^\circ\text{C}$; 5 - то же, №3 при $t_{вх} = 50^\circ\text{C}$; 6 - ТТ с модулем $= 0,3$, объем за равки $V_3 = 2,13\text{см}^3$; 7 - $m = 0,3$, $V_3 = 3,7\text{см}^3$; 8 - $m = 0,2$, $V_3 = 5,8\text{см}^3$; 9 - $m = 0,2$, $V_3 = 2,17\text{см}^3$; 10 - $m = 0,5$, $V_3 = 2,6\text{см}^3$.

Рис. 3.

Используем соотношение для толщины $\bar{\delta}_c$ микропленки жидкости в целях применительно к условиям внутренних каналов гофров:

$$\bar{\delta}_c \sim \sqrt{\frac{\gamma' dR/d\tau}{\rho' dP/dR}} \sim \sqrt{\frac{\gamma' dl_c/d\tau}{\rho' dP''/dl_c}}. \quad (3)$$

Энергетическая модель роста парового снаряда позволяет оценить скорость роста:

$$\frac{dl_c}{d\tau} = \frac{4q t_r l_c}{\pi d_g^2 \epsilon \rho''}. \quad (4)$$

Перепад давлений в системе: паровой снаряд P'' - жидкость в объеме за гофром P_∞ , а также скорость истечения теплоносителя определяются из уравнений:

$$P'' - P_\infty = \text{const } \rho' w^2, \quad (5)$$

$$w = \frac{dl_c}{d\tau} \left(\frac{d_c}{d_g} \right)^2 n_F (b \times t_r). \quad (6)$$

Из системы уравнений (1)-(6) следует обобщающее соотношение для коэффициента теплоотдачи:

$$\bar{Nu}_* = c_1 Re_*^n K_*. \quad (7)$$

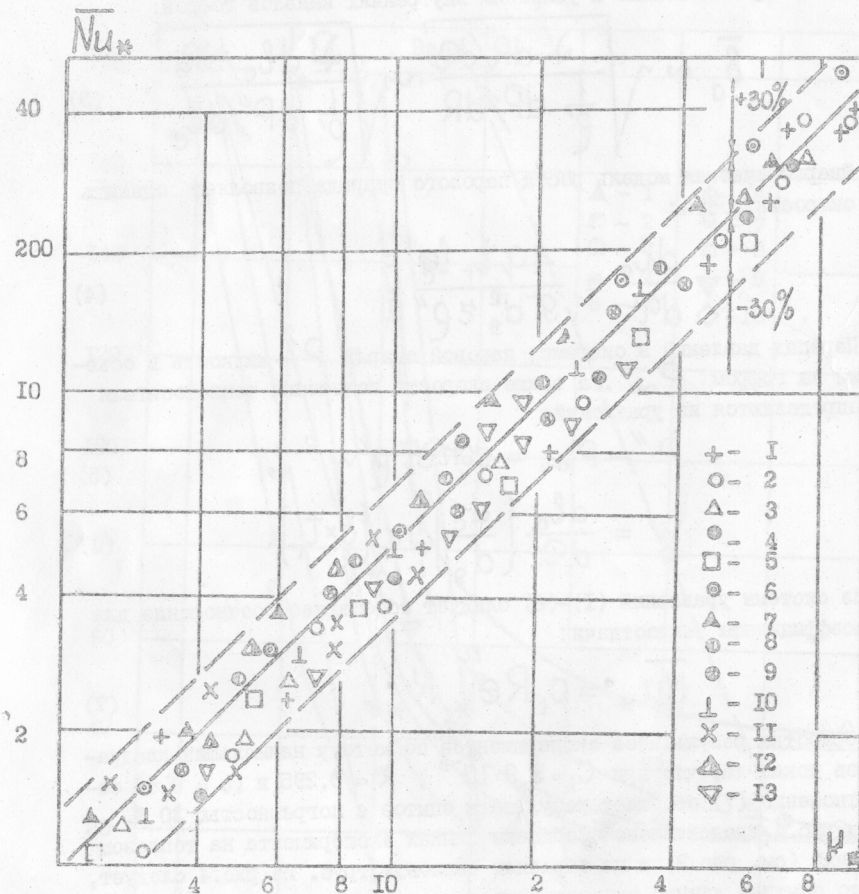
Обработка результатов экспериментов по методу наименьших квадратов показала, что при $c_1 = 3,9 \cdot 10^{-3}$, $K = 0,295$ и $n = 0,65$ соотношение (7) обобщает результаты опытов с погрешностью 30%. На рис. 4 представлено обобщение данных эксперимента на тепловом клине (см. рис. 2) и на образцах тепловых труб. Из рис. 4 следует, что опытные данные удовлетворительно согласуются с предложенным обобщением.

В основу модели для определения предельного теплового потока положено гидродинамическое уравнение ТТ:

$$\Delta p_{\text{кап}} \geq \Delta p' + \Delta p_{\text{гф}} + \Delta p_m. \quad (8)$$

Перепады давлений, вызванные капиллярными и массовыми силами, оценивались по известным соотношениям:

Обработка экспериментальных данных по теплоотдаче при парообразовании в гофрированных структурах ТТ



Модуль $m=0,5$, нерж.сталь: 1 - $b=5,5$ мм; 2 - $b=10,2$ мм; 3 - $b=10,2$ мм; 4 - $b=40$ мм; 5 - медь, $b=40$ мм; модуль $m=0,3$, нерж. сталь, 6 - $b=20,7$ мм; 7 - медь, $b=20,7$ мм; 8 - нерж.сталь, $b=10,5$ мм; 9 - медь, $b=10,5$ мм; 10 - модуль $m=0,2$, медь, $b=19$ мм; 11 - образец ТТ №1; 12 - образец ТТ №2; 13 - образец ТТ №3.

Рис. 4.

$$\Delta p_{\text{кап}} \sim \sigma/d_3, \quad \Delta p_m = \rho' g L_3 \sin \beta. \quad (9)$$

Количественные оценки, проведенные в работе, показывают, что потери давления при движении жидкости по каналам ГКС на участках конденсации и транспорта $\Delta p'$ по крайней мере на два порядка меньше, чем потери давления при движении парожидкостной смеси на участке испарения $\Delta p_{\text{эф}}$. Для определения этой величины предположим, что $\Delta p_{\text{эф}}$ представляет собой сумму потерь давления по длине при движении парожидкостной смеси в каналах ГКС и местного сопротивления выходу пара из стыков полос. При этом характерную скорость примем равной скорости парообразования $W = Q_m / \rho' S_{\text{вых}}$. Тогда:

$$\frac{46}{d_3} + \rho' g L_3 \sin \beta \geq \frac{1}{(1-\varphi)^k} \frac{W^2 L_{\text{ли}}}{d_3^2} \frac{Q_m}{\rho' S_{\text{вых}}} + \frac{1}{2\varphi^2} \left(\frac{d}{L_{\text{ли}}} \right)^2 \left(\frac{Q_m}{\rho' S_{\text{вых}}} \right)^2 \frac{1}{\rho''} \quad (10)$$

Подставляя (9) и (10) в (8) и разрешая его относительно $X = \frac{Q_m d_3^2 \delta^2}{\rho' S_{\text{вых}} W^2 L_{\text{ли}}^2 \rho''}$, получим:

$$X = C_2 \left(\sqrt{1 + C_3 Y} - 1 \right), \quad \text{где } Y = \frac{d_3^4 \delta^2}{\sqrt{2} \rho' L_{\text{ли}}^2 d_3} \left(\frac{46}{d_3} + \rho' g L_3 \sin \beta \right). \quad (11)$$

При $C_2 = 8$ и $C_3 = 0,0183$ соотношение (11) удовлетворительно согласуется с опытными данными автора и исследований Силинского, Жигалова и др. (см. рис.5) при углах наклона ТТ β от $+90^\circ$ до -30° .

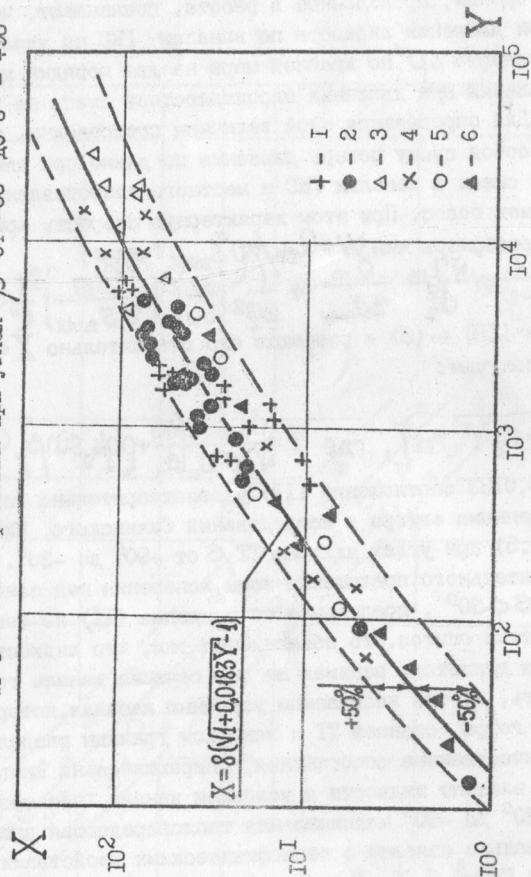
В условиях значительного превышения зоны испарения над зоной конденсации, когда $\beta < -30^\circ$, предельное соотношение (11) не согласуется с результатами опытов. Это объясняется тем, что жидкость на участке испарения движется, занимая не все сечение канала гофров, а лишь его часть, по так называемым условным каналам, которые образуются профилем гофра, стенкой ТТ и мениском границы раздела фаз (см. рис.6а). Качественные соображения, опирающиеся на анализ сил, действующих на элемент жидкости в условном канале, показывают, что при β от -30° до -90° максимальная теплопередающая способность ТТ функционально связана с теплофизическими свойствами жидкости; геометрией ГКС: $b, d_3, t_r, N_r; \beta$. Обработка опытных данных на основе этих представлений дает следующее соотношение для расчета $Q_{\text{ти}}$:

$$Q_m = C_4 N_r t_r^2 \frac{6 \rho'}{8 |\sin \beta|}. \quad (12)$$

Результаты сопоставления экспериментальных и расчетных данных показаны на рис. 6б при $C_4 = 0,047$.

В четвертой главе приводятся методики поверочного и конструкторского расчетов тепловых труб с ГКС. Основной задачей повероч-

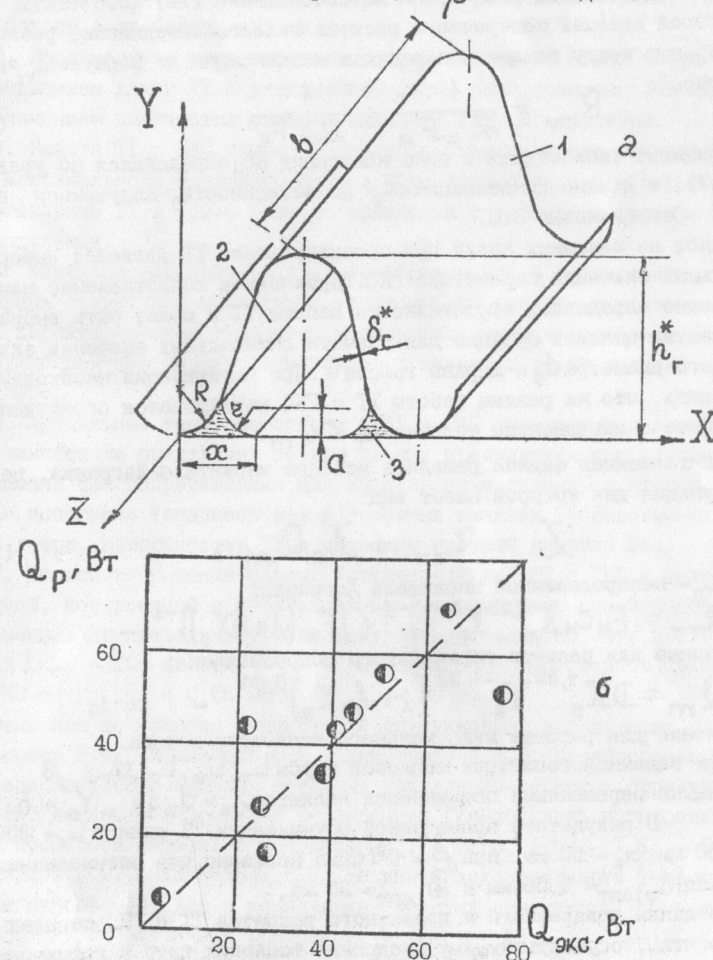
Обработка опытных данных по предельным тепловым потокам в тепловых трубах с гофрированными фитилями при углах β от -30° до $+90^\circ$



1 - ТТ с $m = 0,2$, $V_2 = 2,45 \text{ см}^3$, $3,6 \text{ см}^3$ и $5,8 \text{ см}^3$; 2 - ТТ с $m = 0,3$, $V_2 = 7,2 \text{ см}^3$, $3,7 \text{ см}^3$ и $1,82 \text{ см}^3$; 3 - ТТ с $m = 0,5$, $V_2 = 3,7 \text{ см}^3$; 4, 5, 6 - образцы ТТ №1, №2, №3, соответственно (см. табл. 3).

Рис. 5.

Максимальная теплопередающая способность тепловых труб с гофрированными фитилями при углах ориентации β от -30° до -90°



а - схема работы ТТ с гофрированным фитилем при превышении зоны испарения над зоной конденсации; 1 - профиль фитиля, 2 - внутренний канал ГКС, 3 - теплоноситель в условных каналах ГКС; б - сопоставление экспериментальных и расчетных данных по предельному тепловому потоку.

Рис. 6.

ного расчета ТТ с ГКС является определение максимально возможной ее теплопередающей способности. Эта величина в зависимости от угла наклона ТТ может быть рассчитана по соотношению (II) либо (I2).

Второй задачей поверочного расчета является определение разности температур между зонами испарения и конденсации по формуле $\Delta t_{\text{т}} = Q R_{\text{т}}$, в которой:

$$R_{\text{т}} = \frac{1}{\alpha_{\text{и}} F_{\text{и}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{к}} F_{\text{к}}} \quad (13)$$

Коэффициент теплоотдачи в зоне испарения $\alpha_{\text{и}}$ определялся по уравнению (7), а в зоне конденсации $\alpha_{\text{к}}$ по зависимости, полученной в ОТИХП Семерхановым З.Ш.

Одной из основных задач при проектировании ТТ является выбор оптимальных значений параметров ГКС. Термическое сопротивление наиболее полно определяет эффективность работы ТТ и может быть выбрано в качестве целевой функции для расчета оптимальных значений эквивалентного диаметра $d_{\text{э}}$ и ширины гофров b . При оптимизации необходимо учитывать, что на режимы работы ТТ с ГКС накладываются ограничения, связанное с выполнением условия $Q < Q_{\text{м}}$.

Поставленная задача решалась методом множителей Лагранжа, целевая функция для которой имеет вид:

$$Z = R_{\text{т}} + \lambda_0 Q_{\text{м}}, \quad (14)$$

где λ_0 — неопределенный множитель Лагранжа;

$$R_{\text{т}} = (F_{\text{и}} C_{\text{и}} X_0^{-0,29} Y_0^{0,24})^{-1} + (F_{\text{к}} (A + B X_0))^{-1} -$$

уравнение для расчета термического сопротивления;

$$Q_{\text{м}} = D X_0^{1,65} Y_0^{-0,73} (1 + \beta_2 X_0)^{0,64} -$$

уравнение для расчета максимального теплового потока.

При заданной геометрии тепловой трубы $L_{\text{т}}, L_{\text{и}}, L_{\text{к}}, d_{\text{т}}, \beta$ независимыми переменными оптимизации являются $X_0 = d_{\text{э}}/d_1, Y_0 = b/d_1$.

В результате проведенной оптимизации ТТ длиной $L_{\text{т}} = 209$ мм, $L_{\text{и}} = 80$ мм, $L_{\text{к}} = 60$ мм при $\beta = 0^\circ$ было показано, что оптимальными являются $(d_{\text{э}})_{\text{опт}} = 0,56$ мм и $b_{\text{опт}} = 30$ мм.

Методики поверочного и проектного расчетов ТТ с ГКС переданы предприятию, осуществляющему внедрение тепловых труб с гофрированными фитилями в практику. Рекомендации по оптимальным параметрам гофрированной структуры учтены при отработке серийного производства таких ТТ.

ВЫВОДЫ

1. Интенсивность теплообмена при кипении на поверхностях, покрытых гофрированной капиллярной структурой из металлической фольги,

возрастает с увеличением ширины гофра в 1,2–3,5 раза по сравнению с кипением в свободном объеме, претерпевая максимум при $m = 0,3$.

2. С увеличением модуля гофра предельный тепловой поток возрастает, асимптотически приближаясь при $m = 0,5$ к критическому тепловому потоку в свободном объеме.

3. Максимальная теплопередающая способность ТТ с ГКС возрастает с уменьшением длины ТТ и увеличением длины зоны испарения, а также с увеличением количества полос и величины модуля структуры.

4. Работа ТТ с ГКС при отрицательных углах наклона снижает величину максимального теплового потока и увеличивает полное термическое сопротивление ТТ в 1,5–4 раза по сравнению с работой в горизонтальном положении.

5. Механизм теплообмена при парообразовании в гофрированных капиллярных структурах аналогичен таковому при кипении в щелевых каналах и характеризуется термическим сопротивлением микрослоя жидкости, образующегося при формировании паровых снарядов во внутренних каналах гофров.

6. Предельные тепловые потоки в ТТ с ГКС определяются двумя гидродинамическими пределами: первый из них проявляется при условии превышения сил сопротивления над капиллярными силами, а второй — при полном испарении теплоносителя в условных каналах, образованных профилем гофра, поверхностью ТТ и мениском границы раздела фаз.

7. На основе решения задачи оптимизации для ТТ с ГКС с целевой функцией, построенной с использованием термического сопротивления и ограничения по предельному тепловому потоку, получено, что для ТТ длиной $L_{\text{т}} = 209$ мм при $\beta = 0^\circ$ максимальный эффект дает применение ГКС с $(d_{\text{э}})_{\text{опт}} = 0,56$ мм и $b_{\text{опт}} = 30$ мм.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Смирнов Г.Ф., Афанасьев Б.А., Виноградова Е.П. Исследование процесса парообразования в сеточных капиллярно-пористых структурах// В кн. докладов Всесоюзной конференции "Теплофизика и гидродинамика процессов кипения и конденсации". — Рига, 1982. — Т. I. — С. 17–19.
2. Смирнов Г.Ф., Виноградова Е.П. Режимы и закономерности теплоотдачи при парообразовании в капиллярно-пористых структурах// Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1986. — №4. — С. 128–137.
3. Афанасьев Б.А., Виноградова Е.П., Смирнов Г.Ф. Теплоотдача при парообразовании в капиллярно-пористых покрытиях// В кн. докладов VII Всесоюзной конференции по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов. — Ленинград. — 1985. — Т. I. — С. 37–41.

xv 944

4. Афанасьев Б.А., Виноградова Е.П., Смирнов Г.Ф. Кризисные явления при парообразовании в сеточных капиллярно-пористых структурах тепловых труб// Инженерно-физический журнал. - 1985. - Т. XIX, - №4. - С.607-614.
5. Афанасьев Б.А., Виноградова Е.П., Смирнов Г.Ф. Теплоотдача и максимальная теплопередающая способность тепловых труб со сплошными гофрированными фитилями// Инженерно-физический журнал. - 1986. - Т. L . - №1. - С.58-65.

Условные обозначения

b - ширина полос, м; d - диаметр, м; F , S - площадь, m^2 ; L - длина ТТ, м; m - модуль ГКС; N - количество шагов ГКС по периметру ТТ, шт.; l - длина шага ГКС, м; δ - толщина, м; φ - паросодержание.

Индексы

m - максимальный; вх - вход; вых - выход; и - испарение; к - конденсация; кап - капиллярный; м - массовый; опт - оптимальный; с - снаряд; тт - тепловая труба; э - эквивалентный; (') и (") - жидкая и паровая фазы.

$$R = \left(\frac{\varepsilon \rho'' \Delta T}{\sigma T_s} \right)^{-1}; \quad Nu_* = \frac{\alpha_n d_9}{\lambda'};$$

$$Re_* = \frac{\rho d_9}{\varepsilon \rho'' \lambda'}; \quad K_* = \left[\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')} \right]^{-0,23} f_1^{1,3} (b x t_r)^{0,765}$$

$$f_1 = \frac{(\varepsilon \rho'')^2 \lambda'}{\sigma T_s \lambda'}; \quad f_2 = f_1 \cdot \frac{\rho' g L_9 \sin \beta}{2 \sigma}.$$

БВ

25.05.88