

Автореферат
Г 55

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

ГЛУШЕНКО Николай Иванович

УДК. 536.27

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОСБМЕН
В КОЛЬЦЕВЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕРМОСИФОНАХ (ОБЛАСТЬ
НИЗКИХ ДАВЛЕНИЙ)

Специальность 05.14.05 - Теоретические
основы теплотехники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

XV 966

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БИБЛИОТЕКА

Одесса - 1990

Работа выполнена в СПКТБ "Эксімер" при Одесском институте
низкотемпературной техники и энергетики

Научный руководитель - кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Г. А. Савченко

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор В. В. Фисенко
- кандидат технических наук,
доцент В. О. Мамченко

Ведущая организация - ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР

Защита диссертации состоится "26" марта 1990 г.
в 11⁰⁰ часов на заседании специализированного совета К.068.27.01
при Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики по
адресу: 270057, г.Одесса, ул. Петра Великого, 1/3, ОИНТЭ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Автореферат разослан "22" февраля 1990 г.

Учёный секретарь
специализированного совета

Р. К. Никульшин

№ 20-03-226

22.90

испечено к печати 30.01.90.
130. Заказ 210-90

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время большое внимание уделяется проблеме экономии энергетических ресурсов. Одним из путей её решения является утилизация низкопотенциальных теплоты и холода.

Достижение поставленной задачи возможно на основе применения кольцевых двухфазных термосифонов (КДФ), характеризующихся простотой конструкции (рис.1), высокой эффективностью теплопереноса, надежностью.

Отличительная особенность КДФ от контура естественной циркуляции состоит в наличии приёмника теплоты непосредственно в опускном участке и отсутствии расширительной ёмкости в термосифоне. Конструкция КДФ обуславливает сопряженное протекание кипения и конденсации при наличии разделения потоков паровой и жидкой фаз. Отсутствие зоны со встречным движением фаз в КДФ существенно уменьшает гидравлическое сопротивление контура по сравнению с сопротивлением обычных термосифонов. Разработка теплопередающих устройств на основе КДФ невозможна без наличия анализа процессов протекающих в контуре. Детальное изучение характеристик этих процессов позволяет создать инженерную методику теплогидравлического расчёта теплопередающих устройств с КДФ.

Работа выполнялась в соответствии с комплексными программами АН СССР и АН УССР по проблеме "Теплофизика и теплоэнергетика" (шифры I.9.I.3.4. и I.9.I.I.I.2) на 1980 - 1990 гг.

Целью работы является разработка сопряженной модели теплопереноса в КДФ на основе комплексного экспериментального изучения локальных структурных и гидродинамических характеристик одно- и двухфазных потоков и интенсивности теплообмена при естественной циркуляции.

Научная новизна. Впервые проведено комплексное экспериментальное исследование процессов теплообмена и гидродинамики в КДФ на основе определения локальных характеристик потока промежуточного теплоносителя и использования автоматизированной системы сбора и обработки эмпирической информации.

В диссертационной работе защищаются следующие научные положения:

- особенности процессов переноса в КДФ определяются амплитудно-частотными характеристиками колебаний потока промежуточного теплоносителя, возникающих в результате пульсаций динамического двухфазного слоя;
- количество пара, генерируемого жидкостью с поверхности

границы двухфазного слоя, на порядок повышает его количество переносимое к этой поверхности паровыми пузырями;

- минимальное значение недогрева жидкости на входе в испаритель КДТ определяется гидравлическим сопротивлением потока промежуточного теплоносителя в двухфазном и паровом транспортном участках термосифона.

Основные научные результаты, новизна которых защищается в работе:

1. Для исследованного диапазона тепловых нагрузок и давлений значение модуля скорости колебательного движения жидкости в опускном участке термосифона в 10-12 раз превышает значение скорости циркуляции.
2. Гидравлическое сопротивление опускного участка КДТ превосходит гидравлическое сопротивление его парового транспортного участка в 4-9 раз.
3. Посредством конвекции жидкости в двухфазном потоке, к его границе с паром переносится до 90% теплоты.
4. У границы двухфазного слоя с паром имеет место понижение значения паросодержания на 5-25% и температуры жидкости на (2-8)К.
5. По длине подъемного и парового транспортных участков КДТ имеет место изменение температуры промежуточного теплоносителя на (1-8)К, обусловленное гидравлическим сопротивлением этих участков.

Практическая ценность. По результатам настоящей работы создана инженерная методика, алгоритм и программа расчёта теплообменников на основе КДТ. Используя основные положения методики можно еще на стадии эскизного проектирования теплообменников обосновано учитывать гидродинамические особенности контура, влияющие на процессы теплообмена. Полученные результаты использованы при проектировании теплообменников для судовых систем кондиционирования воздуха.

Реализация работы. На производственном объединении "ЭКВАТОР" в г. Николаеве изготовлены и испытаны опытно-промышленные образцы теплообменников с КДТ, предназначенные для транспортных средств. Экономическая эффективность от внедрения составляет 429 тысяч рублей на одно судно в год.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников ОТИХП в 1983-1989 гг. Межотраслевой конференции "Теплофизические исследования - 79. Тепловые трубы - теплообмен, гидродинамика, технология", г. Обнинск, 1979 год, УШ Всесоюзной научно-технической конференции "Современное состояние и перспективы раз-

вития кондиционирования воздуха на судах", г. Николаев, 1984 год, конференции "Безопасность эксплуатации судовых энергетических установок", г. Севастополь, 1988 год.

По теме диссертации опубликовано шесть печатных работ, три научно-технических отчёта, депонированных Всесоюзным институтом информации, получены положительные решения по заявкам № 4213188, № 4270846 и № 4392675.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, пяти глав заключения, списка литературы и приложений.

Диссертация содержит 150 страниц машинного текста, 110 рисунков, 15 таблиц и 53 страницы приложений; библиография: 151 наименование, из них 40 иностранных.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В КДТ

Для описания процессов теплопереноса был рассмотрен контур КДТ (рис.1), состоящий из четырёх транспортных участков, а также участков испарения и конденсации. Границы транспортных зон КДТ определялись наличием, как минимум двух точек по длине термосифона, в которых температура стенки равна температуре насыщения и где изменяется направление теплового потока между внутренней поверхностью контура и теплоносителем.

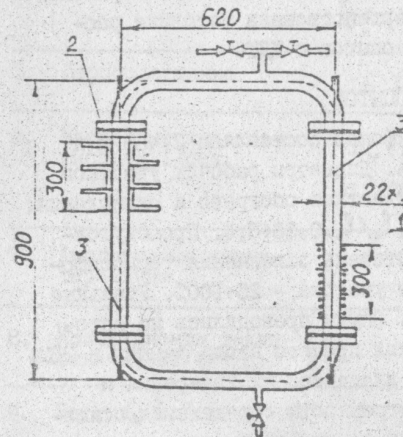


Рис. 1 Конструкция КДТ; 1 - нагреватель; 2 - охлаждающая жидкость; 3 - транспортные участки.

Основными допущениями при описании модели являются: постоянство массового расхода промежуточного теплоносителя, неизменность интенсивности теплообмена в пределах каждого из рассматриваемых участков, отсутствие потерь теплоты в окружающую среду и изменения температуры промежуточного теплоносителя по длине КДТ. В односторонней постановке,

на основе законов сохранения энергии и массы для каждого из участков разбиения получена система дифференциальных уравнений, описывающая изменение расхода паровой фазы и температуры поверхности. Для обогреваемого участка эта система имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dG_n}{dz} - \frac{\alpha_u(t_c - t'') \cdot 2\pi r}{z_n} = 0 \\ \frac{d^2 t_c}{dz^2} - \frac{2r\alpha_u t_c}{\lambda_c(R^2 - r^2)} = - \frac{2Rq_u + 2r\alpha_u t''}{\lambda_c(R^2 - r^2)} \end{cases} \quad (1)$$

Условиями сопряжения для участков КДТ являются:

$$t_c = t'' \quad \text{при} \quad z = l_{TP1} \quad \text{и} \quad z = l_{TP2} \quad (2)$$

а также условия непрерывности температуры поверхности КДТ, её производной и массового паросодержания на границах участков термосифона. Связь расхода паровой фазы и температуры поверхности термосифона определяется уравнением:

$$t_c = \frac{dG_n}{dz} \cdot \frac{z_n}{\alpha; 2\pi r} + t'' \quad (3)$$

Проведенное сопоставление расчётных и предварительных экспериментальных результатов показало, что отклонения расчётных значений температуры поверхности и паросодержания от экспериментальных обусловлены величиной средних коэффициентов теплоотдачи рассчитанных по литературным данным, а также влиянием неравномерности интенсивности теплоотдачи по длине участков и несоответствием расхода пара по высоте зоны обогрева величине тепловой нагрузки. В соответствии с анализом результатов расчёта, за счёт введения n - разбиения на каждом из участков, была усовершенствована методика расчёта и определены условия проведения опытов с КДТ.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Общая длина испытываемых термосифонов составляла 2,468 м и 2,818 м. Материал - нержавеющая сталь. Диаметры рабочих участков - 0,019 + 0,021 м. Соотношение длин участков обогрева и охлаждения: $l_u/d_{cu} = 4,76 + 14,28$; $l_o/d_{cu} = 5,0 + 15,0$; $l_u/l_o = 0,33 + 3,0$. Промежуточный теплоноситель - дистиллят воды. Степень заполнения термосифонов относительно высоты обогреваемого участка - 25+100%. Удельные тепловые нагрузки - $(2+80) \cdot 10^3$ Вт/м². Опыты проводились на автоматизированной установке, имеющей канал прямого ввода данных в ЭВМ. Перечень измеряемых в опытах величин диапазоны их измерения и погрешности приведены в таблице I. Погрешности определения основных характеристик в КДТ рассчитывались по графам вычислительных процессов реализуемых в ЭВМ. Измерение локальных значений паросодержания в КДТ проводилось с помощью датчиков игольчатого типа, описанных в работах В.И.Субботина и др. В основу схем из-

Таблица I

Основные величины измеряемые в опытах

№ п/п	Измеряемая величина	Методы измерений и диапазон изменений величин	
		Метод прямого измерения	Расчетно-экспериментальный метод
1.	Количество теплоты, Вт	$Q_{\text{наог}}, 25 \div 1400$	$Q_{c,u}, 3,2\% ; \Delta Q_{\text{пот}}$
2.	Температура, °C	$t_{co}(z), 17 \div 88 ;$ $t_{cu}(z), 25 \div 500 ;$ $t_{c,TP}(z), t'_{TP}(z),$ $t'_{TP}(z), t''(z);$	$t_{cu}(z), t_{co}(z)$ $\Delta t_{\text{нег}}, 9,7 \div 65$
3.	Давление, Н/м ²	$p''(0,04 \div 1,0) \cdot 10^5 ;$	$\Delta p_{\text{обог}}, \Delta p_{TP},$ $\Delta p'_{TP}, \Delta p_{\text{об}}$
4.	Скорость, м/сек	$w_{TP}^I(r, \tau), 0,04 \div 0,06 ;$ $w_{TP}^{II}(r, \tau), 0,5 \div 2,0 ;$ $w_u^{\text{II}}(r, \tau), 0,04 \div 0,2 ;$	$w_{TP}^I ; w_{TP}^{II} ; w_u^I(z);$ $w_u^{\text{II}}(z), w_{\text{об}}$ 4%
5.	Паросодержание	$\varphi_c(z, r), 0,0 \div 1,0 ;$	$\varphi(z, r); < \varphi >; 1\%$
6.	Частотные характеристики, 1/сек.	$\omega_{\varphi}(z, r), 0,0 \div 100 ; \omega_c(z);$ $\omega(z), 3 \div 7 ; \omega_p^I(z); \omega_p^{\text{II}}(z),$ до 26,3%	
7.	Амплитудные характеристики	$A(p), 0,01 \div 0,04 ;$ $A_t(p)$	
8.	Коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м ² °C)		$\alpha_u(z), (6 \div 40) \cdot 10^2 ; 15,4\%$ $\alpha_o(z), (1 \div 10) \cdot 10^3, 18\%$
9.	Расход, кг/с	$G(V_{\text{тор}}, \tau_{\text{зан}})$	$G(w^{\text{II}}, \varphi)$
10.	Характерный размер пузырей, м		$R(\tau, l_o); 15\%$

мерения положен резистивно-емкостный метод, разработанный Ю.Е.Похваловым. Скорость движения и характерные размеры паровой фазы в двухфазном потоке измерялись одноэлектродными датчиками по методике основанной на анализе огибающей импульсов разбаланса моста. Поло-

жение уровня теплоносителя в КДТ, а также частота и амплитуда его колебаний устанавливались резистивно-емкостными датчиками уровня. Изменения давления в КДТ регистрировать по показаниям виброкомпенсированных пьезокерамических датчиков описанных в работах Л.Я. Дубовика, Н.К. Андреева и др. Температурные колебания теплоносителя в КДТ определялись по показаниям медь-константовых микротермопар. Динамическая торировка зондов производилась с помощью лазера ЛГН-502 по методике Н.Афгана. Измерение скорости однофазных потоков в КДТ осуществлялось термопарными анемометрами с температурной компенсацией. Коэффициенты теплоотдачи при кипении и конденсации определялись по величине тепловой нагрузки и разности температур между рабочей поверхностью термосифона и температурой промежуточного теплоносителя в зоне определения коэффициентов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КДТ

По результатам опытов с КДТ установлено, что основным источником пульсаций динамического двухфазного слоя являются процессы образования, роста и всплытия пузырей (рис.2). При этом колебания

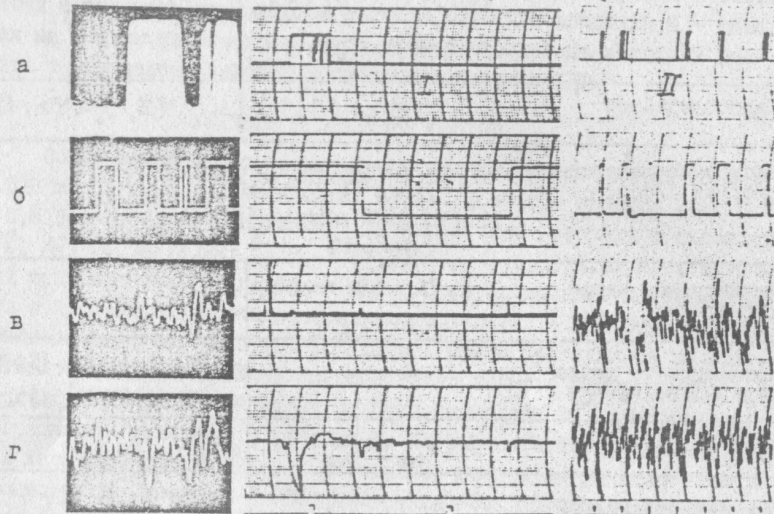


Рис.2. Типичные осциллограммы и распределение во времени сигналов датчиков паросодержания (а) колебаний уровня (б), давления в жидкости (в) и паровом (г) каналах при их синхронной записи (I-явление подтягивания жидкости в следе пузырей, II-влияние образования пузырей).

потока возникающие на обогреваемом участке термосифона распространяются по всему контуру КДТ. Осредненные во времени значения скорости жидкости в двухфазном потоке, в предположении, что плотность и скорость паровой фазы незначительно изменяются по сечению канала, определялись по среднеинтегральным значениям в сечении скорости пузырей и паросодержанию:

$$\bar{w}'_{2\phi} = \bar{w}'_{*0} \cdot \frac{1 - \bar{w}'_{*0} \varphi / (w' \rho)}{1 - \varphi} \quad (4)$$

Изменение скорости пара в паровом канале термосифона незначительно. Профиль скорости пара на этом участке является параболическим, т.е. имеет форму характерную для ламинарных потоков. Слабое влияние пульсаций динамического двухфазного слоя на скорость движения пара в паровом канале объясняется наличием сжимаемости пара и величиной его скорости, которая более чем на порядок превышает скорость колебаний двухфазного потока (Рис.3). На входе участка конденсации профиль скорости пара также является

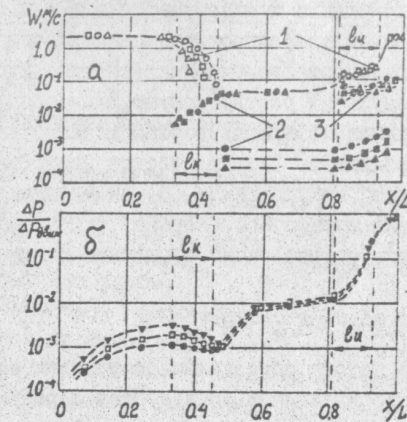


Рис.3 Распределение скоростей движения (а) и потерь движущего напора (б) в контуре КДТ; 1 - скорость паровой фазы; 2 - скорость жидкости; 3 - скорость двухфазного потока.

параболическим, а её величина по длине охлаждаемой зоны уменьшается. Наиболее сильное влияние процессов образования и всплытия пузырей сказывается на движении жидкости в опускном участке термосифона. Под воздействием пульсаций двухфазного слоя, движение жидкости в

опускном участке термосифона преобразуется в возвратно-поступательное движение и характеризуется наличием скин-эффекта и W-образного профиля скорости. В соответствии с этим, направление распространения возмущений оказывается противоположным направлению циркуляции, что создаёт обратную связь между обогреваемым и охлаждаемым участками. При этом амплитудно-частотная характеристика этого движения определяется частотой собственных колебаний контура, а режим движения зависит не только от числа Re, но и от величины ускорения потока (Рис.4).

Величина осреднённого значения модуля скорости жидкости при

колебательном движении более чем на порядок превышает значение скорости циркуляции.

В соответствии с вышеизложенным, гидравлическое сопротивление этого участка КДТ определяется с учетом его частотных характеристик:

$$\Delta P_{ж} = \left[\left(\frac{\sqrt{\omega \tau_{тр}} / (8\gamma')}{2} + 0,4 \right) \cdot \frac{64\gamma' l'}{2\bar{w}_{жк}^2 \cdot r_{тр} \cdot D} + \frac{260\gamma'}{\bar{w}_{жк}^2 \cdot D} + 0,4 \right] \cdot \frac{\rho' w_{жк}^2}{2}, \quad \frac{d\bar{w}_{жк}}{d\tau} = 0,3 \div 140 \quad (5)$$

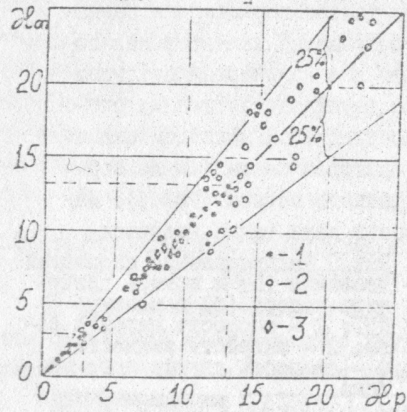


Рис.4. Результаты сопротивления расчетных значений нестационарного коэффициента трения с экспериментальным: 1 - экспериментальные данные Д.Н.Попова; 2 - экспериментальные данные С.В.Денисова; 3 - КДТ.

Величина этого сопротивления на порядок превышает значение сопротивления полученного по результатам расчета с использованием скорости циркуляции и оказывается в 4 ÷ 9 раз больше сопротивления парового транспортного участка (рис.3б). Этот результат соответствует значениям прямых измерений перепада давления

в КДТ приведенным в работе Н.М.Трубникова. Гидравлическое сопротивление опускного участка рассчитанное по уравнению (5) значительно меньше гидравлического сопротивления двухфазного потока, величина которого определяется в соответствии с уравнением о балансе движущих сил и сил сопротивления

$$\Delta P_{дф} = g(\rho' - \rho'') \cdot (\varphi_{обж} \cdot l_{дф} - l_{прс}) (1 - \varphi_{прс}) - \Delta P_{жтр} - \Delta P_{птр} \quad (6)$$

При этом сопротивление двухфазного потока обусловленное трением составляет 10÷40% от его полного сопротивления и согласуется с результатами Р.А.Херринджа, М.Р.Девиса, А.И.Хозе и Ю.И.Шарова. Это свидетельствует о том, что расчет гидравлического сопротивления КДТ необходимо проводить с учетом особенностей движения теплоносителя на каждом из его участков и их взаимного влияния.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ И КОНДЕНСАЦИИ В КДТ

Результаты экспериментальных исследований показали, что основное изменение тепловых и структурных характеристик потока промежуточного теплоносителя в КДТ происходит на его обогреваемом участке и на границе двухфазного слоя с чистым паром (рис.5). Анализ процес-

са теплообмена на обогреваемом участке КДТ показал наличие изменяющихся по его длине значений коэффициентов теплоотдачи. Изменение коэффициентов теплоотдачи определяется интенсивностью протекающих процессов и режимами движения двухфазного потока. При этом выделены три основных участка: эконмайзерный, неразвитого и развитого кипения. Карта режимов движения в КДТ строилась на основании опытных данных о структурных характеристиках теплоносителя в контуре. Расположение участков определялось согласно зависимости приведенной в работе Т.Шулявского.

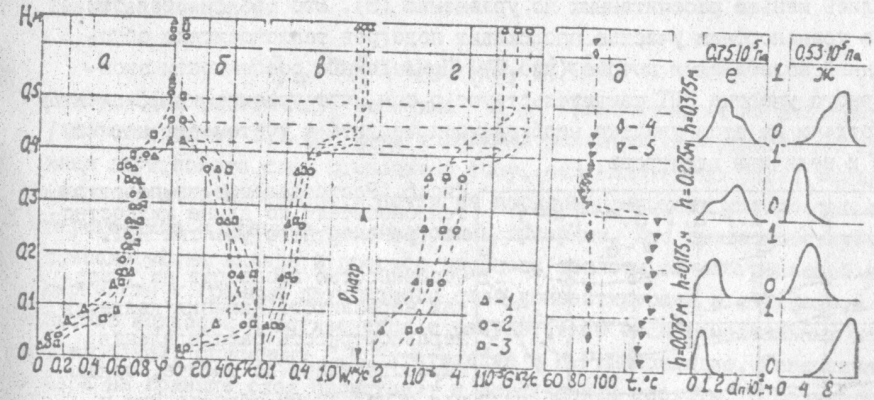


Рис.5. Распределение паросодержания (а), частоты следования пузырей (б), скорости паровой фазы (в), расхода пара (г), температуры (д), а также размеров пузырей (е) и амплитуды температурных колебаний по высоте подъемного участка КДТ; 1 - q = 14260 Вт/м², 2 - q = 37420 Вт/м², 3 - q = 61580 Вт/м², 4 - температура теплоносителя, 5 - температура поверхности трубы.

Особенностью эконмайзерного участка КДТ является изменение его размеров и величины недогрева жидкости на входе связанное с колебаниями потока. Наличие недогрева промежуточного теплоносителя характерно для КДТ и отмечено в работах Н.М.Трубникова и И.П.Таирова. С учетом недогрева количество теплоты переносимое в КДТ может быть представлено в виде суммы:

$$Q = G \cdot \tau + G(i_{вх1} - i_{вх2}) \quad (7)$$

в которой первое слагаемое является составляющей обусловленной непосредственно процессом парообразования, а второе - величиной недогрева теплоносителя:

$$\Delta t_{негр\sum} = \Delta t_{негр\min} + \Delta t_{покл} \pm \Delta t_{жтр} \quad (8)$$

где $\Delta t_{негр\min}$ зависит от величины гидравлического сопротивления двухфазного слоя и пара на транспортном участке

$$\Delta t_{негр\min} = f(P, \Delta P_{дф.тр}, \Delta P_{п}) \quad (9)$$

Второе слагаемое уравнения (8) определяет величину переохлаждения жидкости на участке конденсации занятом "газовым поршем", а третье - характеризует изменение температуры конденсата в жидкостном транспортном участке при наличии теплообмена с окружающей средой. Потери теплоты в окружающую среду определяются теплоизоляцией и в опытах с КДТ составляют 10-20% от значения Q подв.

Экспериментальные значения величины недогрева жидкости на входе в эконмайзерный участок также, как и величина самого участка оказались меньше рассчитанных по уравнению (8). Это объясняется тем, что на транспортном участке происходит подогрев теплоносителя обусловленный колебаниями потока (рис.6). Приведенные особенности эконмайзерного участка КДТ свидетельствуют о том, что расчет коэффициентов теплоотдачи на этом участке необходимо проводить с учетом его истинной длины и величины недогрева.

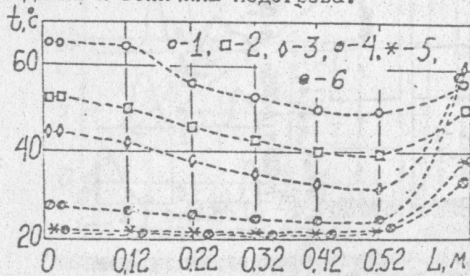


Рис.6. Распределение температуры теплоносителя по длине жидкостного транспортного участка КДТ.

Особенностью процессов на участках неразвитого кипения является неравномерность распределения паросодержания по высоте, связанная с условиями образования и всплытия пузырей. Эти условия определяются соотношением гидравлических сопротивлений участков КДТ и влияют на степень взаимодействия между пузырями, предопределяя возникновение режимов их слияния или дробления. В этих зонах кипения преобладающим является режим слияния пузырей. Для этого режима характерно отрицательное влияние давления на коэффициенты теплоотдачи отмеченное в работах О.П.Иванова, Г.Н.Даниловой, М.К.Безродного, Д.В.Алексенко, Г.Н.Есбровича, И.И.Гогонина, а также Е.Ишибаши и К.Нишикавы. Кроме этого, необходимо отметить значительное влияние на величину коэффициентов теплоотдачи неравномерности распределения температуры на обогреваемой поверхности. Эта неравномерность обусловлена не только режимами течения теплоносителя, но также количеством центров парообразования, их распределением, состоянием поверхности и т.д.

В режиме работы термосифона высота динамического двухфазного слоя превышает зону участка обогрева, а его граница находится на транспортном участке. Этот участок является адиабатным, однако по его высоте, как было установлено в опытах, происходит значительное изменение расхода паровой фазы, паросодержания, температуры жидкости и поверхности. Для расхода пара, определяемого в опытах по

значениями его скорости и паросодержанию ($G_n = \dot{w}_n \cdot F_{np} \cdot \varphi \cdot \rho''$) имеет место скачкообразное увеличение обусловленное дополнительным испарением жидкости с поверхности на границе двухфазного слоя с паром. Связь между количеством пара, образующегося на поверхности двухфазного слоя, и изменением давления в момент прорыва оболочки пузыря можно определить по величине плотности теплового потока через оболочку в соответствии с известной из кинематической теории газов зависимостью

$$q_{zр} = \xi z \Delta p_n \sqrt{g \rho' / (2 \pi b t)} \quad (10)$$

Для условий работы КДТ, величина $q_{zр}$ рассчитанная по зависимости (10) составляет $1,7 \cdot 10^5$ Вт/м². Наличие развитой поверхности на границе двухфазного слоя приводит к тому, что количество пара, испаряющегося с этой поверхности почти на порядок превышает количество пара переносимое к границе слоя паровыми пузырями. Это свидетельствует о преобладающем вкладе в процесс переноса теплоты от обогреваемой поверхности к границе двухфазного слоя конвектирующей в двухфазном потоке жидкости и согласуется с результатами экспериментальных исследований, описанных С.С.Кутателадзе и И.Г.Шекриладзе. Генерация пара на границе слоя происходит с поглощением теплоты. В результате этого процесса имеет место переохлаждение жидкости на поверхности двухфазного слоя относительно температуры насыщения. В опытах это переохлаждение составило $2+8^\circ\text{C}$ (рис.5д). Аналогичный эффект переохлаждения жидкости для естественной конвекции в режиме испарения был зарегистрирован И.А.Цветковым, У.Н.Бакировым и Т.М.Соловьевым. Переохлаждение теплоносителя на границе двухфазного слоя с паром свидетельствует о наличии неравновесного состояния на этом участке КДТ и соответствует положению о конечности промежутка времени перехода в равновесное состояние, приведенному В.В.Фисенко и являющемуся одной из фундаментальных гипотез релаксационного рассмотрения процессов. Явление переохлаждения жидкости на границе двухфазного слоя с паром создает градиент температуры по высоте двухфазного слоя и является термическим сопротивлением для процесса генерации пара с поверхности этого слоя. В этих условиях, одним из путей интенсификации переноса теплоты является применение надставок большего диаметра, расположенных над обогреваемым участком.

В соответствии с вышеизложенным, локальные значения коэффициентов теплоотдачи при кипении обобщены в форме зависимости характерной для естественной конвекции

$$Nu = A \cdot Ra_*^n \cdot (z/l)^m \quad (11)$$

и полученной на основе анализа дифференциальных уравнений, описывающих процессы теплообмена в КДТ.

Экспериментальные данные по паросодержанию входящему в число Ra_x обобщены зависимостью для коэффициента скольжения фаз

$$K = A_1 \cdot Re^{n_1} \cdot We^{n_2} \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''}\right)^{n_3} \cdot \left(\frac{x}{1-x}\right)^{n_4} \cdot \left(\frac{z}{\ell}\right)^{n_5} \cdot \left(\frac{d}{\ell}\right)^{n_6} \quad (12)$$

Обобщение всех экспериментальных данных основано на решении системы уравнений полученной из условий минимума частной производной по каждому из критериев. Решение проводилось по методу Гаусса и реализовано на ЕС-1022. Значения коэффициентов, показателей степени в обобщающих зависимостях и погрешности обобщения приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Значения коэффициентов и показателей степени в обобщающих зависимостях по теплообмену при кипении в КДТ и паросодержанию двухфазного потока.

№	Коэффициент (показатель)	Экспериментальный участок	Участок неравнотого кипения	Участок развитого кипения
1.	A	$0,845 \cdot 10^{-3}$	$0,1609 \cdot 10^{-4}$	$0,5844 \cdot 10^{-4}$
2.	n	0,541	0,675	0,651
3.	m	-0,41	-1,076	-0,295
4.	$\beta_1, \%$	5,0	15,41	7,16
5.	AI	12,394	572,5	$0,1721 \cdot 10^7$
6.	n_1	0,066	-0,0429	0,13
7.	n_2	-0,211	-0,227	0,0984
8.	n_3	0,67	0,612	1,047
9.	n_4	0,654	0,927	1,034
10.	n_5	-1,468	-1,428	-1,1200
11.	n_6	3,99	0,93	2,28
12.	$\beta_2, \%$	6,82	12,9	12,0

Обобщение коэффициентов теплоотдачи при конденсации проводилось с учетом влияния колебаний потока в контуре, величины недогрева и наличия неконденсирующихся примесей. При наличии неконденсирующихся примесей в термосифоне образуется газовый поршень, который может частично закрывать поверхность конденсации. Это явление описано в работах Г.А.Савченкова и И.Н.Мирмова.

В опытах по распределению температуры по поверхности секционированного конденсатора регистрировалось положение "газового поршня" его высота и степень размытости границы поршня с паром (рис.7а) Пренебрегая изменением растворимости воздуха в воде при изменении давления и влиянием динамического напора ($\Delta P_{дин} \approx 1 \cdot 10^{-4} P_{раб}$), в

соответствии с законом порционных давлений для определения высоты газового поршня можно рекомендовать следующее выражение:

$$l_{г.п.раб} = \frac{4 P_{нат} \cdot V_{г.нат} (1 - P_D / P_{нат})}{\pi d^2 \cdot \rho_{габ}} \quad (13)$$

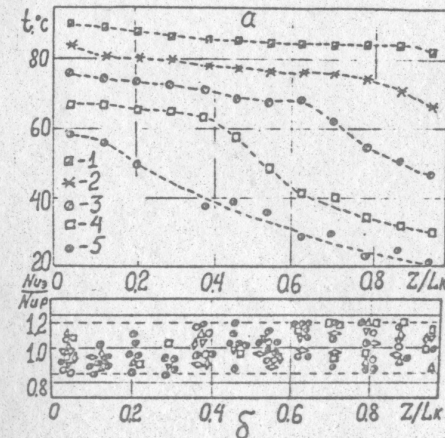


Рис.7. Распределение температуры поверхности по длине охлаждаемого участка КДТ (а) и результаты сопоставления экспериментальных данных по конденсации в КДТ с зависимостью Нуссельта (б).

Учет действительной величины участка конденсации и степени недогрева позволили описать экспериментальные данные по локальным значениям коэффициентов теплоотдачи зависимостью Нуссельта для конденсации неподвижного пара (рис. 7б). Расброс экспериментальных данных ($\epsilon_{max} = \pm 18\%$) определяется степенью размытости границы между газовым

поршнем и паром. Наличие тесной связи гидродинамики и теплообмена в контуре обусловило при проектировании теплообменников с КДТ необходимость проведения совместных теплогидравлических расчетов. Испытания теплообменников спроектированных и изготовленных на основании расчетов по установленным в работе закономерностям теплообмена и гидродинамики, показали хорошее согласование полученных характеристик теплообменников с расчетными.

ВЫВОДЫ

1. Представленная в работе физическая модель теплопереноса в КДТ может быть рекомендована для приближенного расчета аксиального распределения температуры в контуре и определения его наиболее теплонапряженных участков.
2. Расчет гидравлического сопротивления жидкостного транспортного участка КДТ должен проводиться с учетом колебательного движения жидкости.
3. Величина недогрева промежуточного теплоносителя на входе в обогреваемый участок КДТ определяется гидравлическим сопротивлением контура, положением газового поршня и условиями теплообмена на жидкостном транспортном участке.

xv 966

4. Превалирующей составляющей теплового потока от обогреваемой поверхности КДТ к границе двухфазного слоя с паром является составляющая обусловленная конвекцией жидкости.
5. На границе двухфазного слоя с паром имеет место термическое сопротивление обусловленное переохлаждением жидкости.
6. При проектировании теплопередающих устройств с КДТ, тепловой расчет необходимо производить с учетом гидравлических характеристик потока промежуточного теплоносителя.
7. На основе анализа материалов работы в плане дальнейших исследований целесообразно рекомендовать более детальное изучение распределения генерации пара по высоте подъемного участка контуров.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Савченков Г.А., Глушенко Н.И., Маевский В.Л. Применение низкотемпературных термосифонов в системах кондиционирования воздуха. //Тез. докл. Всесоюзной конф. по холоду, 1977г. - Ташкент : С.25-27.
2. Савченков Г.А., Чумак И.Г., Глушенко Н.И., Кунаков В.Г. Теоретическое и экспериментальное исследование низкотемпературных термосифонов и применение их в холодильной технике. //Докл. III Международный конгресс по тепловым трубам. Пало-Альто, США, 1978г.
3. Савченков Г.А., Глушенко Н.И., Кунаков В.Г., Лобачев С.С., Маевский В.Л. Исследование теплообмена и гидродинамики в низкотемпературных термосифонах. //Материалы межотраслевой конф. Теплофизические исследования - 1979 - Обнинск: 1979г., С.69-75.
4. Савченков Г.А., Маевский В.Л., Антонов Н.О., Глушенко Н.И. Эффективность теплообменников с кольцевыми термосифонами для судовых систем кондиционирования воздуха. //Тез. докл. VIII Всесоюзной науч.-техн. конф.: Науч.-техн. общество им. А.Н. Кириллова - 1984г. - С.153-156.
5. Глушенко Н.И., Савченков Г.А., Чумак И.Г. Автоколебания при кипении в кольцевых термосифонах. //Тез. докл. УП Всесоюзн. конф. 23-25 окт. - Л.: 1985, т.2, - С.425-427.
6. Авторское свидетельство № 1523877 опубл. в БИ № 43 за 1989 год.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A - амплитуда, коэффициент; B - универсальная газовая постоянная, Дж/кмоль; c_p - теплоемкость, Дж/кг·к; D, d - диаметр, м; F - площадь, м²; G - расход, кг/с; i - энтальпия, Дж/кг; l - длина, м; m - молекулярный вес, кг/моль; ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с; σ - коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; τ - время, с; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/МК; φ - объемное паросодержание, %; ξ - коэффициент испарения; ω - частота, с⁻¹; X - относительная энтальпия; α - корректив нестационарности.