

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В МИНИАТЮРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

Л.Л. ВАСИЛЬЕВ, А.Г. КУЛАКОВ

*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН
Беларуси*

Введение

Существенное значение для эффективного функционирования элементов электронной аппаратуры имеет проблема поддержания их теплового режима. Задачи терморегулирования различной электронной аппаратуры, телекоммуникационного оборудования и вычислительной техники могут быть успешно решены с помощью тепловых труб [1], [2]. Применение традиционных способов обеспечения теплового режима не всегда осуществимо, так как для отвода больших плотностей теплового потока необходимы развитые теплообменные поверхности, во много раз превосходящие площади источника тепловыделения. Благодаря высоким значениям коэффициентов теплопередачи тепловые трубы способны транспортировать большие тепловые потоки при малых температурных перепадах. Они легко монтируются, могут быть выполнены в любом конструктивном исполнении и имеют небольшую массу, позволяют повысить надежность и уменьшить габариты систем обеспечения теплового режима (СОТР).

В настоящее время проблема обеспечения теплового режима объектов электронной техники становится все более актуальной в связи с все большей их миниатюризацией и ростом удельной энергии тепловыделения. Поэтому в настоящее время существует тенденция миниатюризации применяемых для этих целей тепловых труб.

Разработка и производство перспективных конструкций миниатюрных тепловых труб (МТТ) для СОТР различного оборудования предполагает проведение комплекса научно-исследовательских работ, связанных с изучением особенностей протекания процессов теплообмена в таких тепловых трубах.

Стационарные процессы в МТТ

Выполнено комплексное экспериментальное исследование процессов тепло- и массообмена в миниатюрных тепловых трубах плоской и цилиндрической формы, изготовленных из меди, с водой в качестве теплоносителя, с тремя типами капиллярных структур (порошковой, сеточной и образованной пучком тонких проволок) в широком диапазоне изменения конструктивных и режимных параметров: толщина (диаметр) $2\div 6$ мм; длина $100\div 300$ мм; длина теплонагруженных поверхностей $20\div 150$ мм; толщина капиллярно-пористой структуры (КПС) $0,5\div 1$ мм; ориентация в пространстве $-90^\circ\div +90^\circ$; температура теплоносителя – от $20\text{--}30$ °С до 100 °С; тепловая нагрузка $0\div 100$ Вт при различных условиях подвода и отвода теплоты (водяное и воздушное охлаждение); режимы работы: стационарные, пусковые и переходные. Экспериментальные исследования проведены на установке для исследования характеристик МТТ, описанной в работах [3]–[5].

Установлено, что *ограничение теплопереноса* у тепловых труб с капиллярно-пористыми структурами (КПС) из металлического порошка во всем исследованном диапазоне температур определяется капиллярным пределом (рис. 1). Для МТТ с сеточной и проволочной КПС при горизонтальном положении МТТ кризис теплопереноса обусловлен не только капиллярными ограничениями, но и взаимодействием потоков фаз теплоносителя и блокированием парового канала жидкой фазой (рис. 2).

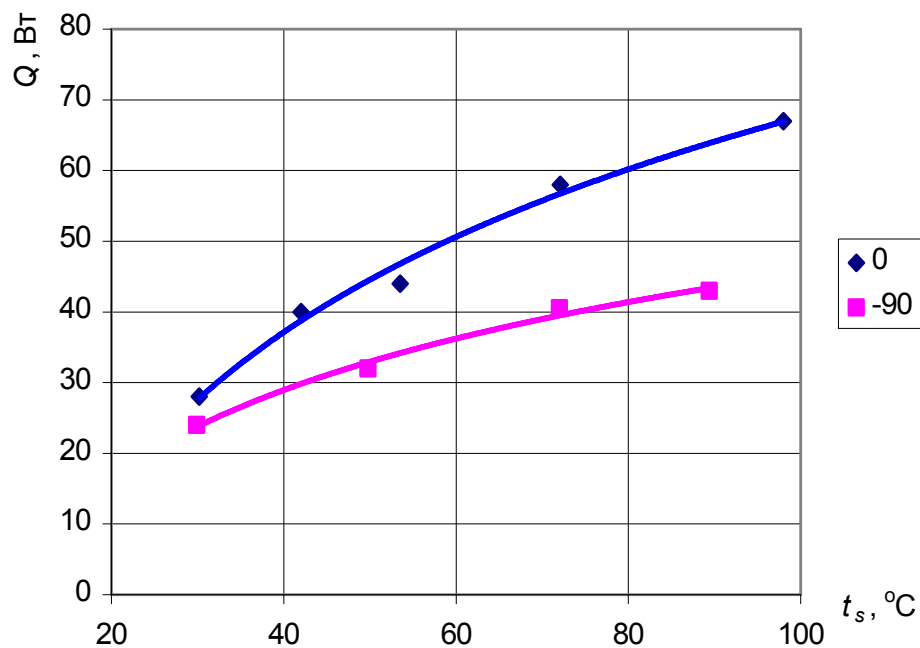


Рис. 1. Зависимость предела теплопереноса от температуры МТТ с порошковой КПС: МТТ5, 0, -90 – угол наклона к горизонту, град

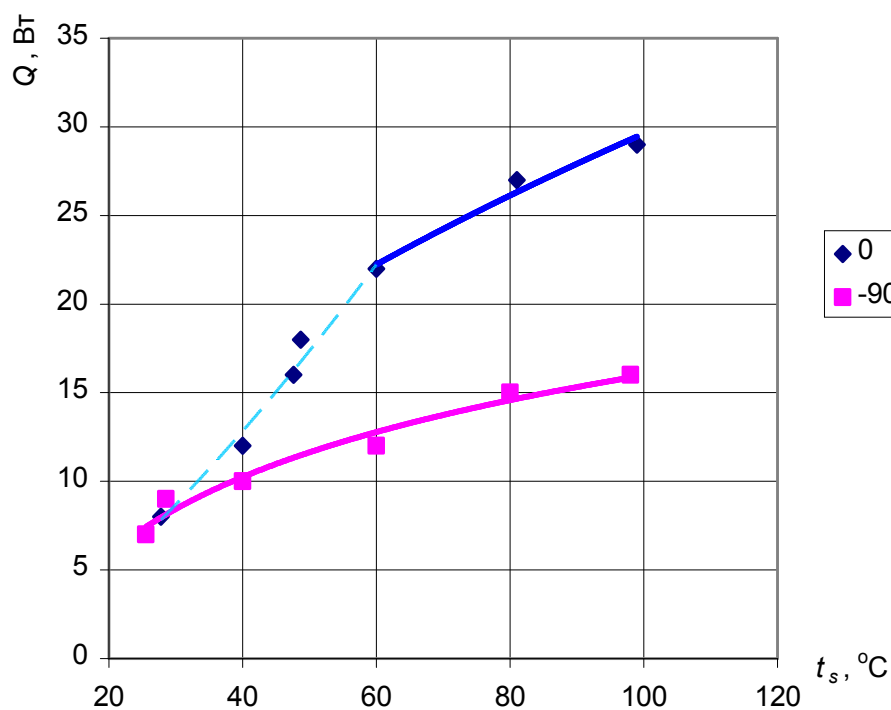


Рис. 2. Зависимость предела теплопереноса от температуры МТТ с сеточной КПС: МТТ4, 0, -90 – угол наклона к горизонту, град

В результате обобщения экспериментальных данных получены эмпирические коэффициенты a_{ent} для расчета этого предела по формуле $Q_{ent} = A_v h_{fg} \sqrt{\frac{y c_v}{r_{ent} a_{ent}}}$: для сеточной структуры $a_{ent} = 1,68 \Theta^{-1,44}$, для проволочной – $a_{ent} = 22,2$, где A_v – площадь сечения парового канала; h_{fg} – теплота парообразования; y – коэффициент поверхностного натяжения; ρ – плотность пара; r_{ent} – капиллярный размер (шаг проволочек).

В результате исследования влияния различных факторов на *интенсивность теплоотдачи* при испарении в миниатюрных тепловых трубах экспериментально установлено, что в МТТ за счет применения тонких нерегулярных КПС достигается существенная (в несколько раз) интенсификация теплообмена в зоне испарения. Этот факт следует учитывать при расчете термического сопротивления МТТ. Получены эмпирические зависимости для оценки эффективной теплопроводности тонких нерегулярных КПС в зоне испарения МТТ, учитывающие не только эффективную теплопроводность насыщенной зоны КПС, но и дополнительный вклад в интенсивность теплоотдачи процесса испарения на заглубленной внутрь КПС межфазной границе.

Установлено, что МТТ с порошковой КПС обладают более высокими теплопередающими характеристиками, чем трубы с сеточной и образованной пучком тонких проволок КПС, что обусловлено более высокими капиллярно-транспортными характеристиками порошковых структур, эффективной теплопроводностью. С помощью целенаправленного изменения вышеуказанных характеристик возможна дальнейшая интенсификация процессов теплообмена в МТТ и повышение их теплопередающих характеристик.

Особенности нестационарных процессов в МТТ

В результате проведенных комплексных исследований эксплуатационных характеристик МТТ установлены закономерности протекания *нестационарных процессов*, связанных с воздействием различных внешних факторов на теплопередающие параметры МТТ: динамического изменения подводимого теплового потока и внешней температуры, угла наклона к горизонту; циклического изменения агрегатного состояния теплоносителя, а также связанных с особенностями проявления кризиса теплопереноса в МТТ и изменением характеристик МТТ после осушения испарителя.

Типичные переходные характеристики для МТТ с погрешностью $\pm 20\%$ описываются зависимостью $\Delta t(\tau) = \Delta t_{\infty} (1 - \exp(-\tau/8,3))$, где t – температура; τ – время.

Экспериментально установлено, что величина максимума теплопереноса в МТТ не зависит от способа его достижения или условий, которые его вызывают, а определяется соответствующим термодинамическим состоянием МТТ, зависящим от рабочей температуры, подводимого теплового потока и угла наклона МТТ.

Исследовано влияние осушения испарителя, вызванного ограничениями теплопереноса, на последующее изменение характеристик МТТ. В частности, обнаружено длительное изменение рабочих параметров миниатюрных тепловых труб с сеткой и проволочным жгутом после вызванного кризисом теплопереноса осушения испарителя и снятия нагрузки, обусловленное влиянием краевого угла смачивания на динамический процесс капиллярного впитывания в зоне испарения. Свойства поверхности КПС, в свою очередь, обусловлены различиями в технологии изготовления промышленно выпускаемых МТТ с разными типами капиллярных структур. Для восстановления насыщенности КПС и работоспособности МТТ после кризиса требуется определенный временной интервал – в начале эксплуатации МТТ от десятков до нескольких часов, постепенно уменьшающийся за время работы МТТ через десятки часов эксплуатации.

Особенностью МТТ является наличие неустойчивых квазистационарных состояний после подвода теплового потока, превышающего критический. Для МТТ, в силу особенностей функционирования, при повышении подводимого теплового потока часто не наблюдается резко выраженного проявления наступления кризиса теплопереноса и момент его наступления оказывается сложно однозначно идентифицировать во время эксперимента. Эти факторы приводят к трудности определения максимальной теплопередающей способности Q_{\max} миниатюрных тепловых труб традиционным методом по непропорциональному росту температуры стенки испарителя при ступенчатом повышении нагрузки. Кроме того, сам традиционный метод имеет определенные недостатки.

Новый экспериментальный экспресс-метод определения максимальной теплопередающей способности МТТ

Был разработан и апробирован новый экспериментальный экспресс-метод определения максимальной теплопередающей способности МТТ по зависимости температуры конца зоны испарения МТТ от времени при постоянной нагрузке при постепенном снижении рабочей температуры МТТ, который обеспечивает, по сравнению с традиционным методом, повышение точности, надежности и скорости его определения (рис. 3). Предварительно МТТ нагревается до определенной температуры путем повышения температуры воды в термостате и соответственно в рубашке охлаждения МТТ, включается нагреватель и подается тепловая нагрузка. Затем при постоянной тепловой мощности $Q = \text{const}$ температура воды в рубашке охлаждения снижается (ab). При достижении МТТ определенной температуры (c) начинается непропорциональный рост температуры испарителя.

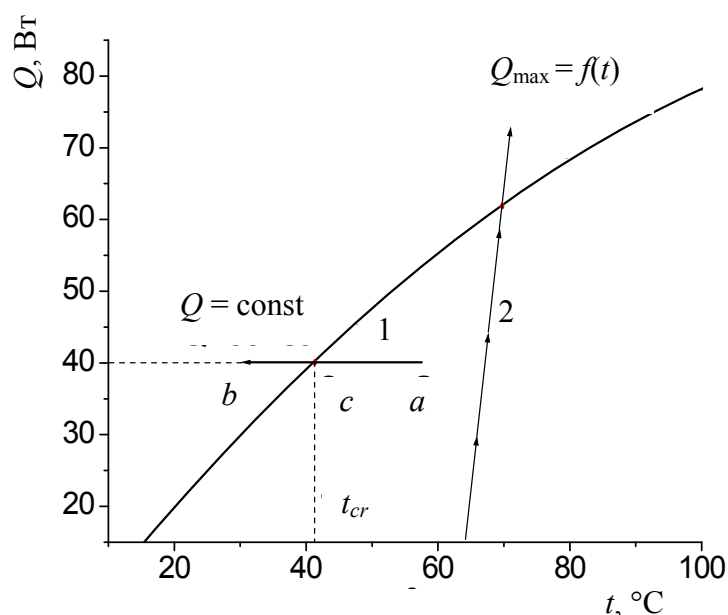


Рис. 3. Диаграмма нового 1-го и традиционного 2-го методов определения Q_{\max} : ab — плавное охлаждение конденсатора МТТ при $Q = \text{const}$; c, d — критические точки

Точка перегиба кривой изменения температуры в конце испарителя (рис. 4) при снижении рабочей температуры МТТ является началом непропорционального роста температуры в испарителе и соответствует достижению максимума теплопереноса. Температура в адиабатической зоне МТТ в момент достижения Q_{\max} является критической температурой t_{cr} для данной мощности. Отметим, что экспериментальные данные, полученные с использованием новой и традиционной методик, хорошо согласуются. Для испытанных МТТ всех типов КПС наблюдался подобный вид кривых $t = f(\tau)$, причем момент достижения кризиса легко фиксируется.

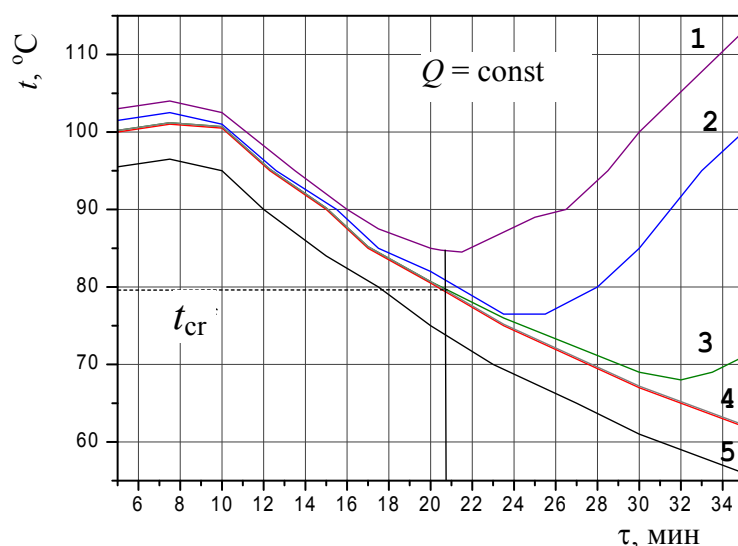


Рис. 4. Изменение температуры вдоль МТТ во время эксперимента: 1 – начало (возле торца МТТ); 2 – середина; 3 – конец испарителя; 4 – адиабатическая зона

Исследование свойств капиллярно-пористых структур, применяемых в МТТ

Капиллярно-пористая структура – основной элемент испарительно-конденсационного оборудования, от которого в значительной степени зависят его характеристики и возможности интенсификации теплообмена в нем. Однако в настоящее время, для являющихся наиболее перспективными капиллярно-пористых структур из спеченного металлического порошка, отсутствуют надежные систематизированные экспериментальные данные по их свойствам. Поэтому было проведено комплексное исследование и определены структурные и капиллярно-транспортные характеристики КПС из спеченного медного порошка с частицами дендритной и округлой формы со

средневзвешенным размером $d_s = d_{s,\min} d_{s,\max} \sqrt{\frac{2}{d_{s,\min}^2 + d_{s,\max}^2}}$ менее 315 мкм, наиболее

широко применяемого в тепловых трубах и испарительно-конденсационных устройствах, где $d_{s,\min}$, $d_{s,\max}$ – соответственно минимальный и максимальный размеры частиц во фракции.

Получены данные по пористости, проницаемости, размерам пор, коэффициенту извилистости КПС и соответствующие аппроксимирующие зависимости. Зависимости по эффективным размерам пор приведены в табл. 1, где d_{ch} – характеристический размер пор, определяющий капиллярный потенциал КПС тепловых труб; d_{\max} – максимальный размер пор, определяющий капиллярный потенциал КПС в испарителях и конденсаторах с капиллярным затвором; d_m – средний размер пор; d_h – средний гидравлический размер пор, определяющий проницаемость КПС $K = d_h^2 \epsilon / 32$, где d_h – гидравлический диаметр пор; ϵ – пористость.

Таблица 1

Экспериментальные данные по эффективным размерам пор

Частицы округлой формы	Частицы дендритной формы	
	$d_s < 120$ мкм	$d_s \geq 120$ мкм
$d_{\max} = 5,47 \cdot 10^{-3} d_s^{0,528}$	$d_{\max} = 3,09 \cdot 10^{-3} d_s^{0,438}$	$d_{\max} = 0,132 d_s^{0,85}$

$d_{ch} = 5,5 \cdot 10^{-3} d_s^{0,539}$	$d_{ch} = 2,31 \cdot 10^{-3} d_s^{0,42}$	$d_{ch} = 0,116 d_s^{0,85}$
$d_m = 8,85 \cdot 10^{-3} d_s^{0,61}$	$d_m = 6,7 \cdot 10^{-4} d_s^{0,315}$	$d_m = 0,315 d_s^{0,996}$
$d_h = 0,004 d_s^{0,55}$	$d_h = 0,0056 d_s^{0,55}$	

Свойства нерегулярных КПС. Зависимость свойств порошковой КПС от толщины характеризуется коэффициентом регулярности пористой структуры, который определяется как отношение равновесного максимального диаметра пор регулярной структуры к максимальному диаметру пор КПС данной толщины: $C_{cs} = d_r/d_{ir}$ [6]. КПС в обычных тепловых трубах и испарительно-конденсационных устройствах часто, а в миниатюрных тепловых трубах практически всегда, являются нерегулярными. При расчете характеристик КПС следует учитывать степень нерегулярности. Однако проведенные к настоящему времени исследования для порошковых КПС ограничены изучением зависимости только максимального диаметра пор от толщины КПС для бронзовых частиц округлой формы [7]. Поэтому были проведены систематизированные исследования свойств нерегулярных порошковых структур из вышеуказанных медных порошков. В результате исследования обнаружен различный характер зависимости от толщины нерегулярных КПС максимального диаметра пор и других структурных характеристик. Полученные экспериментальные данные обобщены в диссертационной работе путем нахождения индивидуальных эмпирических коэффициентов n_r и m для расчета эффективных характеристик с учетом формы частиц порошка (табл. 2).

Таблица 2

Эмпирические коэффициенты для расчета характеристик нерегулярных КПС

	d_m, d_h	d_{max}, d_{ch}	ε	
КПС из порошка с частицами округлой формы				
m	0,28		m_ε	0,28
n_r	18	24	$n_{r\varepsilon}$	6
КПС из порошка с частицами дендритной формы				
m	0,15		m_ε	0,11
n_r	24		$n_{r\varepsilon}$	6

Установлено, что свойства нерегулярных КПС, полученных спеканием свободно-насыпанного порошка, однозначно характеризуются ее толщиной, формой и размером частиц порошка. Для расчета характеристик нерегулярных КПС получены эмпирические зависимости, устанавливающие связь между формой, средним размером частиц порошка, толщиной КПС и всеми другими структурными и капиллярно-транспортными характеристиками. Пористость нерегулярной КПС рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{ir} = \varepsilon \left(\frac{n_{re}}{\delta_{cs}/d_s} \right)^{m_e}, \quad \text{размер пор} - d_{ir,m} = d_m \left(\frac{n_r}{\delta_{cs}/d_s} \right)^m, \quad \text{проницаемость} -$$

$$K = \frac{d_h^2 e}{32} \left(\frac{n_r}{\delta_{cs}/d_s} \right)^{2m} \left(\frac{n_{re}}{\delta_{cs}/d_s} \right)^{m_{re}}, \quad \text{капиллярное давление} - \Delta p_c = \frac{4\gamma \cos i}{d_{ch} (n_r d_s / \delta_{cs})^m}.$$

В формулах: $n = \delta_{cs}/d_s$ – число частиц по толщине слоя; δ_{cs} – толщина КПС.

Инженерная методика расчета максимальной теплопередающей способности миниатюрных тепловых труб

Результаты проведенного экспериментального исследования легли в основу разработанной инженерной методики расчета максимальной теплопередающей способности МТТ в зависимости от геометрических размеров, условий работы, положения в поле гравитации и т. д. [5]. В методике учтены особенности МТТ: форма поперечного сечения МТТ, тип и степень регулярности КПС, взаимодействие потоков фаз

теплоносителя с учетом угла наклона, форма частиц и степень насыщенности порошковой КПС, режим течения пара и перепад давления по паровому каналу, краевой угол смачивания. В методике использованы полученные в диссертационной работе зависимости для расчета предела теплопередающей способности по устойчивости границы раздела жидкость–пар при горизонтальной ориентации МТТ, зависимости для расчета порошковых КПС с учетом степени регулярности, данные по эффективной теплопроводности тонких КПС. Методика позволяет проводить оптимизационный расчет по максимальной теплопередающей способности. Сравнение экспериментальных результатов и расчетных данных показало их удовлетворительное совпадение: в пределах $\pm 10\%$.

Проведенные исследования позволили сформулировать практические рекомендации по повышению эффективности работы МТТ, согласно которым увеличение максимальной теплопередающей способности может быть достигнуто оптимизацией геометрических параметров МТТ и выбором КПС с соответствующими свойствами для заданных эксплуатационных условий с помощью разработанной методики расчета, использованием нерегулярных КПС переменного по периметру сечения из порошка с частицами дендритной формы, выполнением мер по уменьшению краевого угла смачивания, применением КПС с переменными по длине МТТ свойствами.

Оптимизация цилиндрической миниатюрной тепловой трубы с порошковой КПС по пределу теплопереноса

По данным оптимизационного расчета, в соответствии с предложенными рекомендациями для конкретных технических условий, были разработаны и изготовлены экспериментальные образцы МТТ.

Для создания МТТ и обеспечения возможности серийного производства была разработана учитывающая их особенности технология изготовления МТТ с порошковой КПС. Выполнено специальное исследование оптимальной степени заправки МТТ теплоносителем. Проведенные эксплуатационные испытания, включающие определение теплопередающей способности, термического сопротивления, проверку воспроизводимости теплотехнических характеристик, пусковые и переходные режимы, запуск из состояния с замороженным теплоносителем, подтвердили высокие эксплуатационные качества разработанных МТТ.

На рис. 5 приведены характерные данные по теплопередающей способности для МТТ длиной 200 мм и внешним диаметром 4 мм.

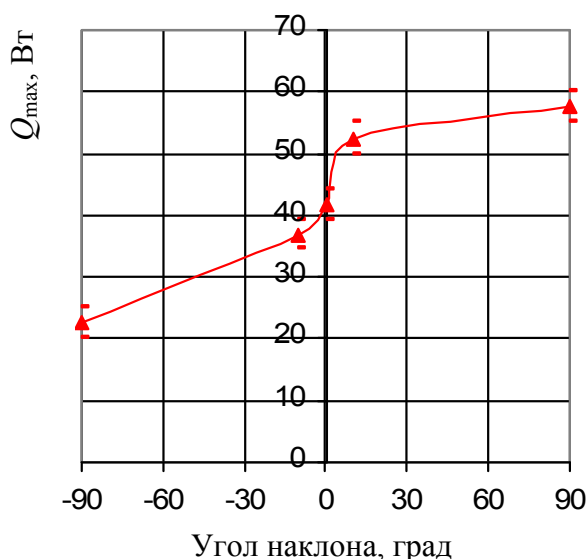


Рис. 5. Зависимость Q_{\max} от угла наклона для разработанных МТТ

Выводы

1. В результате проведенного комплексного экспериментального исследования процессов тепло- и массообмена в миниатюрных тепловых трубах в широком диапазоне изменения конструктивных и режимных параметров установлено, что во всем исследованном диапазоне режимных параметров для МТТ с КПС из спеченного порошка максимальная теплопередающая способность определяется капиллярным пределом. Для МТТ с проволочной и сеточной КПС при горизонтальной ориентации на определенных режимах предел теплопереноса, обусловленный взаимодействием потоков жидкости и пара, наступает раньше капиллярного предела. В результате обобщения экспериментальных данных для расчета этого предела получена эмпирическая зависимость.

2. В результате исследования эксплуатационных характеристик МТТ изучены закономерности протекания нестационарных процессов, связанных с воздействием различных внешних факторов: динамического изменения подводимого теплового потока и внешней температуры, угла наклона к горизонту; циклического изменения агрегатного состояния теплоносителя, а также связанных с особенностями проявления кризиса теплопереноса в МТТ и изменением характеристик МТТ после осушения испарителя. В частности, установлено, что величина максимума теплопереноса МТТ не зависит от способа его достижения или условий, которые его вызывают, а особенности проявления кризиса теплопереноса в миниатюрных тепловых трубах затрудняют его определение традиционным методом.

3. Разработан и апробирован новый экспериментальный экспресс-метод определения максимальной теплопередающей способности МТТ по зависимости температуры конца зоны испарения МТТ от времени при постоянной нагрузке при постепенном снижении рабочей температуры МТТ, который обеспечивает, по сравнению с традиционным методом, повышение точности, надежности и скорости ее определения.

4. Показано, что МТТ с порошковой КПС обладают более высокими теплопередающими характеристиками, чем трубы с сеточной и образованной пучком тонких проволок КПС, что обусловлено более высокими капиллярно-транспортными характеристиками порошковых структур, эффективной теплопроводностью.

5. В результате проведенного систематизированного исследования определены структурные и капиллярно-транспортные характеристики регулярных и нерегулярных капиллярно-пористых структур, полученных спеканием свободно насыпанного порошка с частицами дендритной и округлой формы разных фракций со средневзвешенным размером менее 315 мкм, нашедших наиболее широкое применение в миниатюрных тепловых трубах и элементах двухфазных систем обеспечения теплового режима (СОТР). Для нерегулярных КПС обнаружен различный характер зависимости максимального диаметра пор и других структурных характеристик от толщины КПС. Для расчета характеристик нерегулярных КПС получены эмпирические зависимости, устанавливающие связь между формой, средним размером частиц порошка, толщиной КПС и всеми другими структурными и капиллярно-транспортными характеристиками.

6. На основе установленных закономерностей тепло- и массообмена в миниатюрных тепловых трубах и исследования свойств капиллярно-пористых порошковых структур разработана методика расчета максимальной теплопередающей способности МТТ, учитывающая, в частности, тип КПС, степень ее регулярности, форму частиц и степень насыщенности для порошковой КПС, форму поперечного сечения МТТ, особенности взаимодействия потоков фаз теплоносителя при различных углах наклона, режим течения пара и перепад давления по паровому каналу, краевой угол смачивания. Предложены практические рекомендации по повышению эффективности работы МТТ.

7. По данным оптимизационного расчета в соответствии с предложенными рекомендациями для конкретных технических условий выполнены разработка, изготовление и проведены исследования теплопередающих характеристик экспериментальных образцов МТТ с оптимизированными параметрами по пределу теплопередающей способности, подтвердившие высокие эксплуатационные

характеристики разработанных МТТ, превышающие характеристики промышленно изготавливаемых миниатюрных тепловых тр.

Литература

1. Groll M., Schneider M., Sartre V., Zaghoudi M.C., Lallemand M., Thermal control of electronic equipment by heat pipes //Rev. Cen. Therm, 1998, 37, pp. 323-352.
2. Faghri A., Heat Pipe Science and Technology. Taylor and Francis, Washington, DC, 1995.
3. Vasiliev L.L., Maziuk V.V., Kulakov A.G., Rabetsky M.I., Vukovic M. Miniature heat-pipe thermal performance prediction tool – software Development // J. Applied Thermal Engineering. – 2001. – Vol. 21. – P. 559-571.
4. Кулаков, А.Г. Исследование процессов тепло- и массообмена в миниатюрных тепловых трубах /А.Г. Кулаков //Тепло- и массоперенос – 2001: сб. науч. тр. /ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2002. – С. 32-37.
5. Vasiliev L.L., Kulakov A.G., Antukh A.A., Vasiliev L.L. Jr., Rabetsky M.I., Maziuk V.V. Miniature heat pipes – development and testing //Proc. of the 9th Int. Symp. «Heat transfer and renewable sources of energy», 12 – 15 Aug., 2002, Szczecin, Poland, 2002. – P. 673-680.
6. Косторнов, А.Г. Проницаемые металлические волокновые материалы /А.Г. Косторнов. – Киев: Техника, 1983. – 123 с.
7. Регулярность структуры пористых материалов из порошка бронзы /Р.П. Тодоров [и др.] //Порошковая металлургия. – 1986. – № 3. – С. 31-33.

Получено 25.04.2005 г.